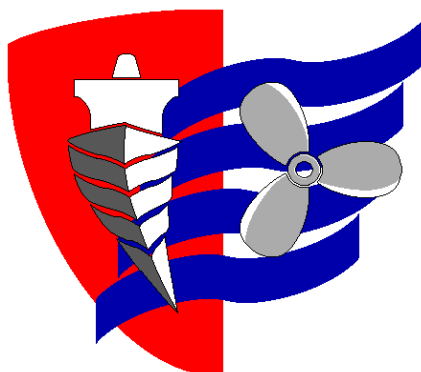


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE ÓXIDOS DE
AZUFRE EN GASES DE ESCAPE**

***Reduction of Sulfur Oxides in Exhaust
Gases***

Para acceder al Título de Máster Universitario en

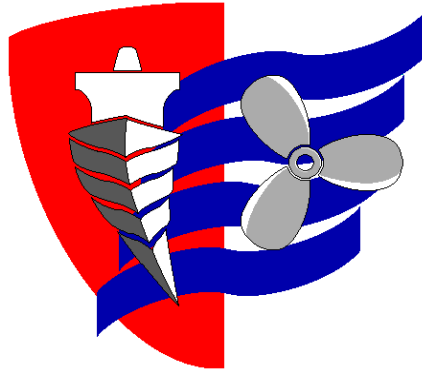
INGENIERÍA MARINA

Autor: Manuel Núñez Fernández

Directora: Belén Río Calonge

Octubre - 2018

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**ESTUDIO DE LA REDUCCIÓN DE ÓXIDOS DE
AZUFRE EN GASES DE ESCAPE**

Reduction of Sulfur Oxides in Exhaust Gases

Para acceder al Título de Máster Universitario en

INGENIERÍA MARINA

Octubre - 2018

INDICE

INDICE	3
Resumen	6
Summary	6
Palabras clave	6
Keywords	6
Tabla de abreviaturas	7
Índice de Figuras	9
1 Introducción	12
1.1 Antecedentes	12
1.1.1 El azufre en los combustibles	13
1.1.2 Formación del SO₂	13
1.1.3 Efectos del SO₂ en la salud y el medioambiente	14
1.1.4 Problemática del azufre en los motores marinos	15
1.2 Naturaleza del trabajo y contexto técnico.....	16
1.3 Justificación y objetivos.....	16
1.4 Relevancia	17
2 Memoria descriptiva	19
2.1 Planteamiento del problema.....	19
2.1.1 Organización Marítima Internacional (OMI).....	19
2.1.2 Definición de las Zonas ECA.....	20
2.1.2.1 Situación geográfica de las Zonas ECA (<i>Convenio MARPOL, 2010</i>):	
21	
2.2 Herramientas de resolución	23
2.2.1 Reducción del contenido de azufre en combustibles líquidos	23
2.2.2 Contenido máximo de azufre del fuelóleo pesado	24
2.2.3 Contenido máximo de azufre del gasóleo.....	25
2.2.4 Contenido máximo de azufre del combustible para uso marítimo..	25
2.2.5 Contenido máximo de azufre de los combustibles para uso marítimo	
utilizados en aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de	
control de la contaminación de los Estados miembros, incluidas zonas de	

control de las emisiones de SO _x , y utilizados por buques de pasajeros en servicios regulares efectuados desde o hacia puertos de la Unión	26
2.2.6 Contenido máximo de azufre de los combustibles para uso marítimo utilizados por los buques atracados en puertos de la Unión	27
2.2.7 Métodos de reducción de emisiones.....	28
2.2.8 Métodos primarios:.....	29
2.2.9 Desulfuración del combustible:.....	29
2.2.9.1 Procesos y operaciones básicos de refinado	29
2.2.9.2 Tipos de procesos de desulfuración	30
2.2.9.3 Hidrodesulfuración (HDS).....	31
2.2.10 Uso de GNL como combustible marino	32
2.2.10.1 ¿Qué es el Gas Natural?	32
2.2.10.2 Tratamiento del Gas Natural	33
2.2.10.3 Reservas de Gas Natural	34
2.2.10.4 Producción de Gas Natural.....	34
2.2.10.5 Consumo de Gas Natural	34
2.2.10.6 Gas Natural Licuado (GNL)	35
2.2.10.7 Almacenamiento terrestre de GNL	36
2.2.10.8 Transporte y almacenamiento de GNL en buques	37
2.2.10.9 Motores marinos con GNL.....	40
2.2.11 Métodos secundarios.....	43
2.2.11.1 Scrubber de tipo seco	43
2.2.11.2 Scrubber de tipo húmedo	43
2.2.11.3 Planes para la legalidad de los scrubber.....	50
2.3 Metodología	59
2.3.1 Análisis de las opciones disponibles.....	59
2.3.2 Uso de combustible con bajo contenido en azufre	59
2.3.2.1 Tipos de combustibles marinos.....	59
2.3.2.2 Variaciones del precio de los combustibles marino.....	62
2.3.2.3 Disponibilidad de los combustibles con bajo contenido en azufre	68
2.3.3 Uso de GNL.....	70
2.3.3.1 Ventajas del uso de GNL	70
2.3.3.2 Problemática del GNL.....	73

2.3.4	Uso de sistemas limpieza de gases.....	74
3	Aplicación práctica.....	77
3.1	Instalación de scrubber en buque MV Ficaria Seaways	77
3.1.1	Introducción	78
3.1.1.1	Datos generales del buque (FleetMon, 2017):	78
3.1.1.2	Capacidad de carga	78
3.1.1.3	Motor principal, auxiliares, y otros sistemas	78
3.1.2	Objetivos y Conclusiones.....	79
3.1.3	Instalación de la torre de lavado.....	82
3.1.3.1	Datos Técnicos	82
3.1.3.2	Descripción de los modos de operación.....	83
3.1.4	Consumo de energía.....	87
3.1.5	Obtención de datos.....	88
3.1.6	Medición de los gases	88
3.1.6.1	Eliminación de SO ₂	89
3.1.6.2	Eliminación de Sólidos Suspendidos	90
3.1.6.3	Eliminación de NO _x	91
3.1.7	Análisis del agua de descarga.....	91
3.1.7.1	Modo agua de mar (SW).....	91
3.1.7.2	Modo agua dulce (FW)	96
4	Conclusiones	101
5	Referencias bibliográficas	104
6	Anexos	109

RESUMEN

El trabajo versará sobre el nombramiento y descripción de la normativa más reciente sobre el control de las emisiones de gases contaminantes por parte de la industria marítima, centrándose en la emisión de óxidos de azufre SO_x .

Después se detallarán las medidas disponibles incluidas y certificadas por las autoridades competentes que las compañías deberán adoptar para cumplir con la normativa.

Las opciones disponibles en este caso son utilizar combustible bajo en azufre que cumpla las disposiciones de las autoridades, utilizar motores consumiendo gas natural, o instalar una torre de lavado de gases de escape.

SUMMARY

The work will focus on the appointment and description of the latest regulation on the control of polluting gases emissions by the maritime industry, focusing on the emission of sulfur oxides SO_x .

Afterwards, the available measures included and certified by the competent authorities that the companies will take to comply with the regulations will be detailed.

The available options are using low Sulphur fuel oil, using engines that burn natural gas, and installing an exhaust gas scrubber.

PALABRAS CLAVE

MARPOL VI, Zonas ECA, Zonas SECA, Óxidos de azufre

KEYWORDS

MARPOL VI, ECA zones, SECA zones, Sulphur oxides

TABLA DE ABREVIATURAS

ASTM: Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)

BN: Número Básico

CEI: Comunidad de Estados Independientes

Código CIG: Código Internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel

CO₂: Dióxido de Carbono

CPC: Contador de Partículas Condensadas

Cst: Centistoke

D/E: Motor Diésel

d.l.: Límite de detección

DF: Doble Combustible (Dual Fuel)

ECA: Área de Control de Emisiones

ELPI: Impactor Eléctrico de Baja Presión

ETM: Manual Técnico de los sistemas de Limpieza de Gases de Escape

FNU: Unidad de formacina nefelométrica

FO: Fuel Oil

FW: Agua Dulce

GHG: Gases de Efecto Invernadero (Greenhouse gases)

GNL/LNG: Gas Natural Licuado/ Liquefied Natural Gas

HDS: Hidrodesulfuración

IBC: Contenedor de graneles intermedio

IBIA: Asociación Internacional de la Industria del Bunkering

IEA: Agencia Internacional de Energía

ISO: Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standarization)

LBSI: Motores de gas de combustión pobre y encendido por chispa (Lean-Burn Spark-Ignited)

MARPOL: Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques

MCR: Régimen Continuo Máximo

MEPC: Comité para la Protección del Medio Ambiente Marino

MPa: Megapascuales

NaOH: Hidróxido de sodio

n/a: No analizado

NC: Nomenclatura Combinada

NO_x: Óxidos de Nitrógeno

OMI: Organización Marítima Internacional

OMM: Manual de Vigilancia a Bordo

PAH: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Ppm: Partes por millón (ej. mg/L)

SECP: Plan de Cumplimiento de las Emisiones de SO_x

SLGE: Sistemas de Limpieza de los Gases de Escape

SMPS: Escáner de Tamaño de Partículas en Movimiento

SO_x: Óxidos de Azufre

SW: Agua de Mar

TEU: Contenedores

Tpm: Toneladas de Peso Muerto

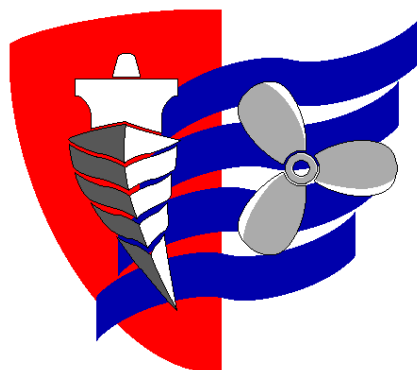
WTI: Petróleo West Texas Intermediate

ÍNDICE DE FIGURAS

Tabla 1: Estado de los Tratados	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2: Estado de las zonas ECA	20
Tabla 3: Distribución de reservas, producción y consumo mundial de gas natural (%)	35
Tabla 4: Relación contenido de azufre / emisiones.....	50
Tabla 5: Relación entre concentración PAH y caudal	57
Tabla 6: Especificaciones ISO 8217 DMA	60
Tabla 7: Especificaciones ISO 8217 DMB	61
Tabla 8: Especificaciones ISO 8217 RME 180 y RMG 180	61
Tabla 9: Especificaciones ISO 8217 RMG 380 y RMK 380.....	62
Tabla 10: Comparación de inversiones según decisión tomada	74
Tabla 11: Límites establecidos por la IMO.....	80
Tabla 12: Consumos de energía	87
Tabla 13: Rango de medición del analizador Siemens ULTRAMAT 23 NDIR	89
Tabla 14: Resultados de aceite contenido en el agua.....	94
Tabla 15: Resultados de los análisis de metales pesados.....	95
Tabla 16: Contenido de metales pesados	98
 Ilustración 1: Localización de las Zonas ECA	 22
Ilustración 2: Posibles nuevas zonas ECA	22
Ilustración 3: Metanero "Jules Verne" en terminal de Le Havre (Fra)	36
Ilustración 4: Esquema de un tanque de almacenamiento de GNL terrestre.....	37
Ilustración 5: Perfil de la estructura de un buque gasero	38
Ilustración 6: Esquema de un tanque de GNL de tipo "membrana"	39
Ilustración 7: Esquema de un inyector doble usado en motores Dual Fuel	41
Ilustración 8: Esquema de un motor de gas LBSI.....	42
Ilustración 9: Esquema de un sistema de alimentación de gas natural.....	42
Ilustración 10: Scrubber de ciclo abierto.....	44
Ilustración 11: Scrubber de ciclo cerrado.....	47
Ilustración 12: Scrubber de ciclo híbrido	48
Ilustración 13: Buque MV Ficaria Seaways.....	77

Ilustración 14: Instalación de la torre de lavado a bordo del FICARIA SEAWAYS	82
Ilustración 15: Modo Agua de Mar (SW)	83
Ilustración 16: Modo Agua Dulce (FW)	84
Ilustración 17: Centrifugadora y Separador.	97
Gráfico 1: Composición de distintos Gases Naturales según el yacimiento.....	33
Gráfico 2: Variación del precio IFO 380	63
Gráfico 3: Variación del precio IFO 180	63
Gráfico 4: Variación del precio MDO	64
Gráfico 5: Variación del precio MGO	64
Gráfico 6: Consumo de combustible según contenido de azufre.....	68
Gráfico 7: Previsión de consumos de combustible marino, MGO vs IFO	69
Gráfico 8: Comparación de emisiones de CO ₂	70
Gráfico 9: Comparaciones de emisiones MDO vs GNL	71
Gráfico 10: Comparación precio Crudo vs Gas Natural	72
Gráfico 11: Consumo de hidróxido sódico (NaOH) por tonelada de fuel oil en función del contenido en azufre	86
Gráfico 12: Tabla de equivalencia entre contenido en azufre en el combustible, con el nivel de limpieza en la torre de lavado en función del modo de operación y la carga del motor	90
Gráfico 13: Turbidez del agua de entrada y de descarga	92
Gráfico 14: Niveles de PAH medidos de forma continuada.....	93

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Un porcentaje muy alto del transporte de mercancías mundial se realiza por medio del transporte marítimo gracias a sus muchas ventajas, como su capacidad de carga, sus infraestructuras portuarias sólidas y conexiones con otros medios para completar las operaciones de transporte, el hecho de que enlace a la mayoría de países del mundo y su capacidad de adaptación a las distintas cargas.

El último estudio sobre gases de efecto invernadero o GHG (greenhouse gases), realizado por la OMI en el año 2014 (*GHG Study, 2014*), en el que se recogieron datos sobre emisiones de gases contaminantes emitidos por los barcos durante el periodo de tiempo comprendido entre el año 2007 y el año 2012, se estimó que la flota internacional de barcos emitió anualmente una media de 20.9 millones de toneladas de NO_x (como NO₂), y 11.3 millones de toneladas de SO_x (como SO₂), estas cifras representan el 15% y el 13% de NO_x y SO_x respectivamente de los totales producidos por fuentes antropogénicas.

En 2016, el comercio marítimo creció un 2.6 %, alcanzando los 10.3 billones de toneladas transportadas. El comercio de bienes por vía marítima se dividió en alrededor del 35 % en economías desarrolladas, ~ 60 % en economías en desarrollo, y ~ 5 % en economías en transición (Review of maritime transport, 2017).

Debido a estos datos, la OMI, por medio del Anexo VI del MARPOL, está implementando normativas cada vez más restrictivas para reducir las emisiones de gases contaminantes, sobre todo de los óxidos de azufre SO₂.

1.1.1 EL AZUFRE EN LOS COMBUSTIBLES

El petróleo, en su forma más elemental, contiene azufre en pequeñas proporciones. Según la zona del mundo donde se extraiga, el petróleo poseerá una determinada composición y unas determinadas características, es decir, su contenido en azufre variará.

Los petróleos se clasifican según su contenido en azufre en (*Petróleo, 2010*):

1. Petróleo dulce
2. Petróleo medio
3. Petróleo agrio

1. El petróleo dulce es el que cuenta con una proporción de azufre menor al 0,5 % en masa; es un tipo de petróleo de alta calidad y uno de sus mayores usos es el procesado para posterior obtención de gasolinas.
2. El petróleo medio se denomina a petróleos con composiciones de azufre que varían entre el 0,5 y 1 % en masa.
3. Respecto al petróleo agrio su composición de azufre es superior al 1 % en masa, lo que resulta en la necesidad de un refinamiento mayor.

En petróleos cuyo uso será como combustible líquido, su precio dependerá del contenido en azufre, esto es, cuanta más proporción de azufre tenga un petróleo, mayor será el proceso de refino, lo que hará que su precio inicial sea inferior.

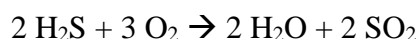
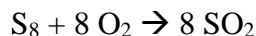
Para determinar el precio de los petróleos (*Petróleo, 2010*), se comparan sus características con las de petróleos de referencia. Los dos petróleos de referencia más utilizados son el Brent, extraído a lo largo del Mar del Norte, y el WTI (West Texas Intermediate), extraído en los campos occidentales de Texas (USA).

1.1.2 FORMACIÓN DEL SO_2

El dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso es un gas incoloro con un fuerte olor característico. Se disuelve en agua formando una disolución ácida.

Obtención del dióxido de azufre (SO_2 / óxido de azufre (IV)):

1. Combustión del azufre y del sulfuro de hidrógeno:



2. Tostado de minerales: entre los que se encuentran la pirita, la wurtzita o la blenda, la galena y el cinabrio.

3. Por reacción del ácido sulfúrico con cobre elemental:



Es también importante destacar que el SO_3 en los gases de escape reacciona con el vapor de agua formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), que precipita y produce desgastes por corrosión dentro de la maquinaria.

1.1.3 EFECTOS DEL SO_2 EN LA SALUD Y EL MEDIOAMBIENTE

Las exposiciones breves al SO_2 pueden afectar al sistema respiratorio humano y dificultar la respiración, sobre todo en niños, ancianos y personas con asma (*Dióxido de Azufre*, 2017).

Emisiones de este contaminante, en grandes concentraciones, generan la formación de otros óxidos de azufre (SO_x), los SO_x en contacto con otros componentes de la atmósfera forman pequeñas partículas que contribuyen a la polución por materia particulada: las partículas pueden penetrar en zonas sensibles de los pulmones y causar problemas de salud adicionales.

En grandes concentraciones, los SO_x gaseosos pueden afectar a árboles y plantas, dañando su follaje y ralentizando su crecimiento.

El SO_2 y otros SO_x contribuyen a la formación de lluvia ácida, la cual puede dañar los ecosistemas.

Teniendo en cuenta los datos de emisiones de SO_2 publicados por la OMI, así como las estimaciones de crecimiento de la industria marítima, se ha llegado a la conclusión de que se deben tomar medidas internacionales para que las emisiones de gases contaminantes por parte de barcos se vean reducidas, estas medidas se han ido endureciendo con el paso de los años.

1.1.4 PROBLEMÁTICA DEL AZUFRE EN LOS MOTORES MARINOS

La utilización de combustibles residuales con un alto contenido en azufre genera anomalías en los motores marinos, sobre todo en los diésel de dos tiempos lentos debido a la necesidad de mejorar rendimientos, aumentando las sollicitaciones térmicas y mecánicas (*Conde et al, 2002*):

1. Como se ha descrito anteriormente, los SO_x que se generan en la combustión, originan la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4), este produce desgastes corrosivos en las zonas de baja temperatura de pistones y camisas de cilindros.
2. Se encuentran depósitos de lacas negras en el interior de las camisas.
3. También se producen desgastes corrosivos por alta temperatura en las válvulas de escape, en asientos de válvulas y las zonas del pistón en contacto con la combustión.

Es importante utilizar lubricantes con la base alcalina (BN) adecuada al porcentaje de azufre del combustible en uso. Una mala elección del lubricante puede llevar a la aparición de scuffing, o desgaste adhesivo, en camisas de cilindros, es decir, un excesivo desgaste de los aros del pistón y las camisas. El fenómeno de scuffing produce estrías ásperas en las superficies que lo sufren. En situaciones críticas, el scuffing puede producir microsoldaduras, ocasionando arrastre de material. El scuffing está asociado a la presencia de zonas expuestas a alta temperatura, resultado del colapso de la película de lubricante.

1.2 NATURALEZA DEL TRABAJO Y CONTEXTO TÉCNICO

Este trabajo, catalogado como estudio o informe de ingeniería, se trata de un estudio técnico y versará sobre el nombramiento y descripción de la normativa más reciente sobre el control de las emisiones de gases contaminantes por parte de la industria marítima, centrándose en la emisión de óxidos de azufre SO_x .

A continuación, se detallarán las medidas disponibles incluidas y certificadas por las autoridades competentes que las compañías deberán tomar para cumplir con la normativa a priori detallada.

Las fuentes utilizadas para recopilar dicha información serán sobre todo los órganos internacionales que emiten la normativa oficial que afecta a toda la industria marítima, la OMI y sus respectivos comités y subcomités.

También será necesario consultar otras bases de datos oficiales, así como casas comerciales, sociedades de clasificación y otras fuentes fiables que den la información técnica necesaria para complementar la información teórica que nos brinda la normativa.

El actual clima de creciente crispación con respecto a la protección del medio ambiente, y los recientes sucesos que indican que el calentamiento global está afectando seriamente a la tierra, han llevado a los representantes internacionales a tomar medidas para paliar dicho calentamiento. Estas medidas incluyen al sector marítimo, un sector que, si bien no representa un nicho de contaminación tan importante en comparación con el servicio y el volumen que representa, posee unas instalaciones y una tecnología que necesita ir reciclándose para poder cumplir con las restrictivas medidas contra la contaminación que se van imponiendo.

1.3 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Este estudio facilitará a las compañías la información necesaria para poder cumplir con la normativa, incluyendo ejemplos de las medidas que pueden tomar en función de las características de sus barcos, así como el criterio que crean oportuno emplear.

El objetivo del estudio es agrupar y describir la normativa existente en materia de reducción de emisiones de SO_x relativa al sector marítimo de manera que se pueda

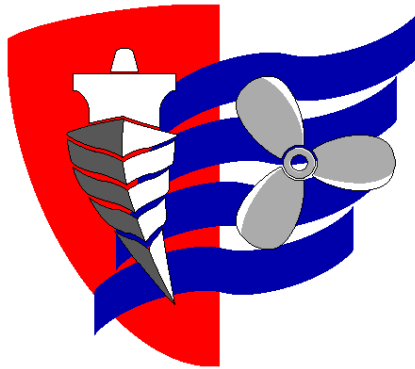
obtener una información general sobre la situación actual, así como realizar una comparación entre los distintos métodos disponibles de reducción de emisiones en los barcos.

1.4 RELEVANCIA

La OMI no cesa en su empeño por conseguir que la industria marítima sea cada vez más limpia y respete el medioambiente. Al igual que en la industria o el transporte terrestres, una de las cosas en las que más se fijan las legislaciones sobre contaminación, es en los gases contaminantes.

En el sector marítimo, las normativas sobre emisiones de gases contaminantes que se van introduciendo de manera global se van endureciendo progresivamente, generando cada vez más incertidumbre por parte de armadores, responsables de refinerías, fábricas de sistemas auxiliares etc., sobre qué hacer para cumplir con las normativas. Este estudio puede resultar beneficioso para valorar qué método sería más adecuado para cumplir con la legislación vigente.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



MEMORIA DESCRIPTIVA

2 MEMORIA DESCRIPTIVA

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.1 ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL (OMI)

La contaminación atmosférica afecta a las poblaciones de muchas regiones ya que tiene la capacidad de viajar grandes distancias arrastrada por el viento y otros fenómenos meteorológicos, desde el foco de su emisión. Este tipo de contaminación tiene un efecto acumulativo, que acaba contribuyendo a la calidad del aire, la salud humana, y el medioambiente.

Es por eso que la Organización Marítima Internacional, por medio de su Convenio MARPOL, ha decidido actuar contra la contaminación atmosférica producida por la industria marítima.

Tabla 1: Estado de los Tratados

Fuente: "Estado de los tratados", OMI, 2017

Tratado	Fecha de entrada en vigor	N.º de países ratificadores	% de la flota mundial
Marpol 1973/1978 (anexos I y II)	02/10/1983	155	99.14
Anexo III Marpol	01/07/1992	147	98.54
Anexo IV Marpol	27/09/2003	141	96.28
Anexo V Marpol	31/12/1988	152	98.72
Protocolo 1997 Marpol (anexo VI)	19/05/2005	88	96.16

La adopción del Anexo VI del Convenio MARPOL en 1997 es prueba de ello. En el Anexo VI se establecen una serie de normativas y medidas para restringir las emisiones

de gases contaminantes a la atmósfera, particularmente las de óxidos de azufre (SO_x), y los óxidos de nitrógeno (NO_x), además de prohibir la emisión de sustancias que agotan la capa de ozono.

Se han ido produciendo varios cambios en el Anexo VI desde su entrada en vigor el 19 de mayo de 2005, pero los más importantes son la progresiva reducción de las emisiones de SO_x, NO_x y materia particulada, además de la creación de las zonas de control de las emisiones (ECA).

Para controlar las emisiones de SO_x, la OMI ha tomado la decisión de ir reduciendo de manera cada vez más restrictiva el contenido en azufre de los combustibles utilizados a bordo, en cualquiera de los sistemas del barco.

Las restricciones del contenido en azufre se clasifican según el tipo de combustible, y según la zona donde se utilizará, es decir, fuera de las zonas ECA y dentro de las zonas ECA (MEPC, 2016).

2.1.2 DEFINICIÓN DE LAS ZONAS ECA

Tabla 2: Estado de las zonas ECA

Fuente: MEPC (2017). Anexo VI MARPOL.

Zona especial	Tipo de control	Adopción	Entrada en vigor	Con efecto desde
Mar Báltico	SO _x	26/09/1997	19/05/2005	19/05/2006
Mar Báltico	NO _x	07/07/2017	**	**
Mar del Norte	SO _x	22/07/2005	22/11/2006	22/11/2007
Mar del Norte	NO _x	07/07/2017	**	**
Norteamérica	SO _x y materia particulada	26/03/2010	01/08/2011	01/08/2012
Norteamérica	NO _x	26/03/2010	01/08/2011	*
Mar Caribe de los Estados Unidos	SO _x y materia particulada	26/07/2011	01/01/2013	01/01/2013
Mar Caribe de los Estados Unidos	NO _x	26/07/2011	01/01/2013	*

* Se establecen 3 niveles de protección dependiendo de la antigüedad del buque:

- Nivel I: para buques construidos entre el 1 de enero de 1990 y el 1 de enero de 2000;

- Nivel II: para buques contruidos a partir del 1 de enero de 2011;
- Nivel III: para buques contruidos a partir del 1 de enero de 2016.

Los niveles de protección se incluyen en el Código Técnico sobre los NO_x, incluido en la Regla 13 del Anexo VI del MARPOL.

**** El MEPC (Comité para la Protección del Medioambiente Marino) en su sesión 71, celebrada entre el 3 y el 7 de julio de 2017, ha adoptado las enmiendas conforme a la Regla 13 del Anexo VI del MARPOL relativa a las nuevas zonas de control de emisiones, para designar las zonas del mar Báltico y del mar del Norte como zonas de control de NO_x.**

2.1.2.1 Situación geográfica de las Zonas ECA (*Convenio MARPOL, 2010*):

- **Zona ECA del mar Báltico:** Por zona del mar Báltico se entiende este mar propiamente dicho, con los golfos de Botnia y de Finlandia y la entrada al Báltico hasta el paralelo que pasa por Skagen, en el Skagerrak, a 57º 44,8'N.
- **Zona ECA del mar del Norte:** Las aguas noroccidentales de Europa incluyen el Mar del Norte y sus accesos, el mar de Irlanda y sus accesos, el mar Celta, el Canal de la Mancha y sus accesos y la parte del Atlántico nororiental que se encuentra inmediatamente al oeste de Irlanda.
- **Zona ECA de Norteamérica:** Incluye las aguas adyacentes a la costa del Pacífico, la costa del Golfo Atlántico y las 8 principales islas de Hawái. Se extiende hasta las 200 millas náuticas desde las costas de Estados Unidos, Canadá y los territorios franceses.



Ilustración 1: Localización de las Zonas ECA

Fuente: Alfa Laval (2017)

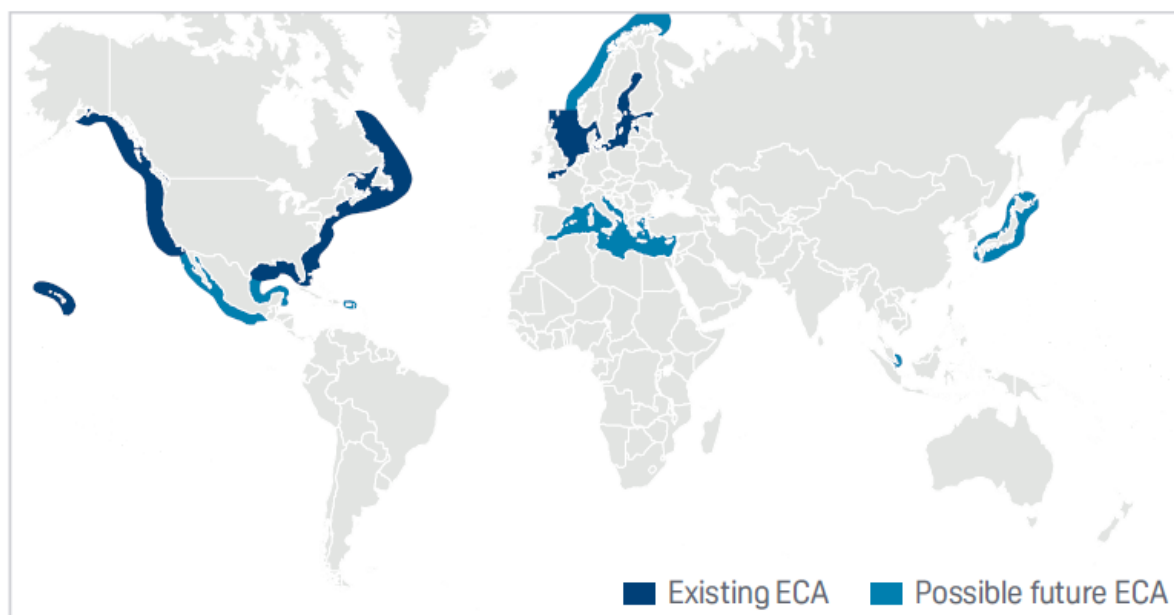


Ilustración 2: Posibles nuevas zonas ECA

Fuente: Platts (2016)

2.2 HERRAMIENTAS DE RESOLUCIÓN

2.2.1 REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La Unión Europea tiene, entre sus funciones, la capacidad para establecer leyes y medidas respectivas a la política medioambiental de los países miembros por medio de programas de medio ambiente.

Uno de sus objetivos es alcanzar niveles de calidad del aire tales que no se produzcan riesgos para la salud humana ni para el medio ambiente imponiendo un nivel de protección elevado.

La Directiva (UE) 2016/802 del Parlamento Europeo y del Consejo fija el contenido máximo autorizado de azufre de fuelóleos y gasóleos para uso marítimo utilizados en la Unión.

Dado que estas medidas están basadas en las dispuestas en el anexo VI del Convenio MARPOL de la OMI, se puede decir que no solo se exigen en países de la Unión Europea, sino en todos los estados miembros de la OMI.

A continuación, se describirán los límites en contenido de azufre establecidos, haciendo distinción según el tipo de combustible, y la zona donde se empleará (*Directiva UE, 2016*).

2.2.2 CONTENIDO MÁXIMO DE AZUFRE DEL FUELÓLEO PESADO

Definiendo como fuelóleo pesado cualquier combustible líquido derivado del petróleo clasificado en los códigos NC¹ 2710 19 51 a 2710 19 68, 2710 20 31, 2710 20 35 o 2710 20 39, con exclusión de gasóleos y diésels, y combustible para uso marítimo, considerado fuelóleo pesado y que haya sido destilado, al menos en un 65 % en volumen, a 250°C por el método ASTM² D86.

El fuelóleo pesado utilizado en el territorio de los estados miembros no debe tener un contenido en azufre superior al 1,00 % en masa.

Se deberán tomar las medidas necesarias para garantizar que las instalaciones de combustión que utilicen fuelóleo pesado con un contenido en azufre superior al 1,00% en masa no puedan funcionar sin un permiso de la autoridad competente que especifique los límites de emisión.

⁽¹⁾Código NC: El Reglamento (CEE) n o 2658/87 del Consejo, de 23 de julio de 1987, relativo a la nomenclatura arancelaria y estadística y al arancel aduanero común), estableció una nomenclatura, llamada «nomenclatura combinada» o, en forma abreviada, «NC», basada en el Convenio internacional sobre el sistema armonizado de designación y codificación de mercancías.

⁽²⁾Método ASTM: los métodos establecidos por la American Society for Testing and Materials en la edición de 1976 de las definiciones y especificaciones normalizadas de los derivados del petróleo y los lubricantes.

2.2.3 CONTENIDO MÁXIMO DE AZUFRE DEL GASÓLEO

Definiendo gasóleo como cualquier combustible líquido derivado del petróleo clasificado en los códigos NC 2710 19 25, 2710 19 29, 2710 19 47, 2710 19 48, 2710 20 17 o 2710 20 19, con exclusión del combustible para uso marítimo, del que menos del 65 % en volumen se destile a 250 °C y por lo menos el 85 % en volumen se destile a 350 °C por el método ASTM D86.

El gasóleo utilizado en el territorio de los estados miembros no debe tener un contenido en azufre superior al 0,10 % en masa.

2.2.4 CONTENIDO MÁXIMO DE AZUFRE DEL COMBUSTIBLE PARA USO MARÍTIMO

Definiendo como combustible para uso marítimo cualquier combustible líquido derivado del petróleo destinado a ser usado a bordo de una embarcación, incluidos los combustibles definidos en la norma ISO³ 8217.

El combustible para uso marítimo utilizado en el territorio de los estados miembros no debe tener un contenido en azufre superior al 3,50 % en masa, excepto los utilizados en buques que cuenten con los métodos de reducción de emisiones que operen con sistemas cerrados.

Los métodos de reducción de emisiones que operan con sistemas cerrados se explicarán más adelante.

⁽³⁾Norma ISO: Norma definida por la Organización Internacional de Normalización que se aplica a los productos y servicios.

2.2.5 CONTENIDO MÁXIMO DE AZUFRE DE LOS COMBUSTIBLES PARA USO MARÍTIMO UTILIZADOS EN AGUAS TERRITORIALES, ZONAS ECONÓMICAS EXCLUSIVAS Y ZONAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS ESTADOS MIEMBROS, INCLUIDAS ZONAS DE CONTROL DE LAS EMISIONES DE SO_x, Y UTILIZADOS POR BUQUES DE PASAJEROS EN SERVICIOS REGULARES EFECTUADOS DESDE O HACIA PUERTOS DE LA UNIÓN

El combustible para uso marítimo utilizado en aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de la contaminación pertenecientes a estados miembros, no debe tener un contenido en azufre superior:

1. a partir del 18 de junio de 2014, el 3,50%;
2. a partir del 1 de enero de 2020, el 0,5%

El MEPC 70 (celebrado en octubre de 2016) examinó una evaluación de la disponibilidad de fueloil para informar de la decisión que deben adoptar las Partes en el Anexo VI del Convenio MARPOL, y decidió que la norma de fueloil (el límite de 0,50% de contenido de azufre) deberán entrar en vigor el 1 de enero de 2020 (resolución MEPC.280 70)).

Estas restricciones se aplican a cualquier buque de cualquier pabellón, incluidos aquellos que inicien su travesía fuera de la Unión, salvo aquellos que utilicen los métodos de reducción de emisiones acordados.

Recientemente, el MEPC 72 (celebrado en abril de 2018) confirmó la implantación del límite del 0,5% de contenido de azufre en los combustibles para el 1 de enero de 2020.

Adicionalmente, y con vistas a su adopción en el MEPC 73 (octubre de 2018), se aprobó un proyecto de enmiendas al Anexo VI del Convenio MARPOL que prohíbe el transporte de fueloil para uso como combustible no reglamentario. Con excepción de aquellos buques que posean sistemas de reducción de emisiones establecidos en el convenio.

Ante la designación de una nueva zona de control de emisiones de SO_x, incluidos los puertos, por la OMI conforme a la Regla 14(3)(b) del anexo VI del MARPOL, habrá un periodo de 12 meses para la entrada en vigor de la restricción de contenido en azufre relativa a estas zonas marítimas.

En el caso de los buques de pasajeros que efectúen servicios regulares desde o hacia cualquier puerto de la Unión, navegando por aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de la contaminación situadas fuera de las zonas de control

de las emisiones de SO_x, deben utilizar combustibles para uso marítimo con un contenido en azufre que no superior al 1,50% hasta el 1 de enero de 2020.

2.2.6 CONTENIDO MÁXIMO DE AZUFRE DE LOS COMBUSTIBLES PARA USO MARÍTIMO UTILIZADOS POR LOS BUQUES ATRACADOS EN PUERTOS DE LA UNIÓN

El combustible para uso marítimo utilizado en los puertos de los estados miembros no debe tener un contenido en azufre superior al 0,10% en masa, el cambio de combustible para cumplir este requisito se hará lo antes posible después del atraque y lo más tarde posible antes de la salida.

Esta restricción de contenido de azufre no se aplicará:

1. cuando los buques vayan a permanecer atracados durante menos de dos horas según horarios oficiales;
2. a buques que apagan todas las máquinas y se conectan a la electricidad de tierra mientras están atracados en puerto.

El cumplimiento de las restricciones es responsabilidad de los Estados miembros, al menos por lo que respecta a los buques con bandera del estado y los buques con cualquier bandera que permanezcan en sus puertos.

Los Estados miembros exigirán que se cumplimenten debidamente los diarios de navegación, así como el registro de operaciones de combustible.

De igual forma, los Estados miembros deberán asegurar la disponibilidad de combustibles para uso marítimo que cumplan con las directrices de esta normativa, y garantizarán que en su territorio no se comercialice combustible diésel para uso marítimo con un contenido de azufre superior al 1,50 % en masa.

Se debe asegurar que los combustibles con diferente contenido en azufre no se mezclen, la disposición de los tanques de combustible, así como los sistemas de trasiego, depuración, precalentamiento, etc., deben asegurar que los distintos combustibles se mantienen separados.

Además, todo sistema que funciona con combustible marino, propulsión, auxiliares, caldera, etc., debe ser capaz de cambiar de combustible según la demanda de la zona de navegación.

La cantidad y disposición de los tipos de combustible será la adecuada atendiendo a la ruta de navegación prevista, el tiempo que se dedicará en cada zona y los puertos desde los que se suministrará el combustible.

2.2.7 MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Como alternativa al uso de los combustibles para uso marítimo que cumplen los requisitos de contenido de azufre, los Estados miembros permitirán a los buques de cualquier bandera la utilización de métodos de reducción de emisiones en sus puertos, aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de la contaminación. En el caso de utilizar sistemas de reducción de emisiones se deberá conseguir, de manera continua, una reducción al menos equivalente a la que se lograría con el uso de combustibles para uso marítimo con reducciones de azufre.

Podemos encontrar dos tipos de métodos de reducción de emisiones, que se diferencian en el periodo de aplicación (*Lamas, M.I. & Rodriguez, C.G, 2012*):

1. Métodos primarios: estos métodos se aplican antes de que se forme el contaminante, es decir, actúan sobre el combustible. Dentro de estos métodos encontramos la desulfuración del combustible, el uso de combustibles alternativos, y el uso de GNL (Gas Natural Licuado).
2. Métodos secundarios: estos métodos se aplican una vez pasado el proceso de combustión, cuando el contaminante se ha formado, se actúa sobre él antes de que se expulse a la atmósfera con el resto de los gases de escape.

2.2.8 MÉTODOS PRIMARIOS

Los métodos primarios se centran básicamente en el combustible a utilizar, es decir, se establece el uso de combustibles cuya combustión va dar niveles de SO_2 que cumplen con las normativas, por lo que se actúa antes de que se genere el contaminante, para ello, lo más común es optar por la desulfuración de los combustibles derivados del petróleo, o el uso del Gas Natural Licuado.

2.2.9 DESULFURACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Para que los combustibles para uso marino cumplan con la normativa actual de reducción de emisiones de SO_x , es necesario que los combustibles cumplan con una serie de restricciones en cuanto al contenido de azufre, dado que estas restricciones son cada vez más estrictas, los procesos de desulfuración son a su vez más grandes y complejos.

Anteriormente al proceso de desulfuración, el petróleo ha de someterse a los procesos de refino para obtener los diferentes combustibles para uso marino nombrados anteriormente.

2.2.9.1 Procesos y operaciones básicos de refino

Los procesos y operaciones de refino de petróleo se clasifican básicamente en: separación, conversión, tratamiento, formulación y mezcla, operaciones auxiliares y operaciones fuera de proceso (*Kraus, 2010*).

- Separación: el petróleo crudo se separa físicamente, mediante fraccionamiento en torres de destilación atmosféricas y de vacío, en grupos de moléculas de hidrocarburos con diferentes intervalos de temperaturas de ebullición, denominados “fracciones”.
- Conversión: Los procesos de conversión más utilizados para modificar el tamaño y/o estructura de las moléculas de hidrocarburos son los siguientes:
 - descomposición (división) mediante hidrocraqueo, craqueo térmico y catalítico, coquización y ruptura de la viscosidad;
 - unificación (combinación) mediante alquilación y polimerización;
 - alteración (rectificación) con isomerización y reforma catalítica;

- tratamiento, entre los métodos de tratamiento se cuentan la eliminación o separación de componentes aromáticos y naftenos, y la eliminación de impurezas y contaminantes indeseados; otros métodos de tratamiento incluyen la desulfuración;
- La formulación y mezcla es el proceso consistente en mezclar y combinar fracciones de hidrocarburos, aditivos y otros componentes para obtener productos acabados con unas propiedades específicas de rendimiento idóneo.
- Operaciones auxiliares de refino. Otras operaciones de las refinerías necesarias para dar soporte al procesado de los hidrocarburos son la recuperación de residuos ligeros; la eliminación del agua amarga; el tratamiento y refrigeración de residuos sólidos, aguas residuales y agua de proceso; la producción de hidrógeno; la recuperación de azufre, y el tratamiento de gases ácidos y gas residual.

2.2.9.2 Tipos de procesos de desulfuración

El proceso de desulfuración se considera parte de los procesos de purificación en el refino del crudo. Esta operación tiene un objetivo doble, la eliminación de compuestos sulfurados para cumplir las normativas de aplicación, y purificar la fracción del crudo que sea posteriormente enviada a procesos con catalizadores especialmente sensibles al azufre (*Caro, 2006*).

Existen dos posibilidades de desulfuración:

- Up-stream: se realiza sobre el crudo, es decir, a la entrada en la refinería;
- Down-stream: se realiza sobre los productos de la destilación. Hoy en día el proceso se realiza habitualmente mediante el proceso down-stream.

Dentro del proceso down-stream, se distinguen los tratamientos de desulfuración reductiva o comúnmente llamado Hidrodesulfuración (HDS) y tratamientos de desulfuración oxidativa o Biodesulfuración.

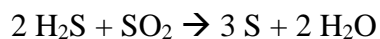
En la actualidad, tan sólo el tratamiento de Hidrodesulfuración (HDS) resulta económicamente viable para la desulfuración de las principales fracciones destiladas y, por tanto, es el generalmente utilizado en las refinerías. Esta técnica consiste en el tratamiento del crudo con hidrógeno catalítico y altas presiones y temperaturas.

2.2.9.3 Hidrodesulfuración (HDS)

El hidrotratamiento consiste, en esencia, en mezclar las fracciones extraídas de crudo con un flujo de gas enriquecido en hidrógeno e hidrocarburos sobre un lecho de catalizador. Esta operación se puede realizar antes o después de precalentar las fracciones de crudo a la temperatura adecuada, entre los 260 y los 425 °C. Las presiones típicas del proceso varían en el rango entre 5 y 10 MPa, dependiendo del rendimiento requerido.

En presencia del catalizador de óxidos metálicos, (Mo_2O_3 , Co_2O_3), la mezcla del gas y el crudo reacciona, de manera que los compuestos aromáticos de azufre, nitrógeno y oxígeno se transforman respectivamente en ácido sulfhídrico, amoníaco, metales libres y agua, mientras que las olefinas se hidrogenan y pasan a convertirse en hidrocarburos con saturación limitada de aromáticos. Así, y aunque la principal función del hidrotratamiento es la desulfuración del crudo, se pueden llevar a cabo también desnitrogenaciones, desoxidaciones, deshalogenaciones, hidrogenaciones y craqueos de hidrocarburo.

Una vez detenida la reacción, los metales permanecen en la superficie del catalizador mientras que el resto de productos son extraídos del reactor. Este efluente es enfriado antes de llegar a un separador, donde se separa el crudo tratado del gas rico en hidrógeno. En una columna de rectificación se agota el crudo de cualquier sulfuro de hidrógeno remanente y de las colas ligeras, y el gas se trata para eliminar el sulfuro de hidrógeno.



La principal ventaja de este tratamiento radica en su poca selectividad, de forma que se desulfura un amplio rango de tipos de compuestos orgánicos azufrados, y el elevado grado de conocimiento e implantación de esta técnica.

Pero a medida que se intentan reducir los contenidos de azufre en las fracciones del crudo, se hacen necesarias condiciones más drásticas de temperaturas y presión en el proceso de HDS, elevando por tanto los costes y riesgos en las instalaciones.

2.2.10 USO DE GNL COMO COMBUSTIBLE MARINO

Otro método primario u opción para cumplir con la normativa de emisiones de SO_x es la utilización de Gas Natural Licuado como combustible en los barcos.

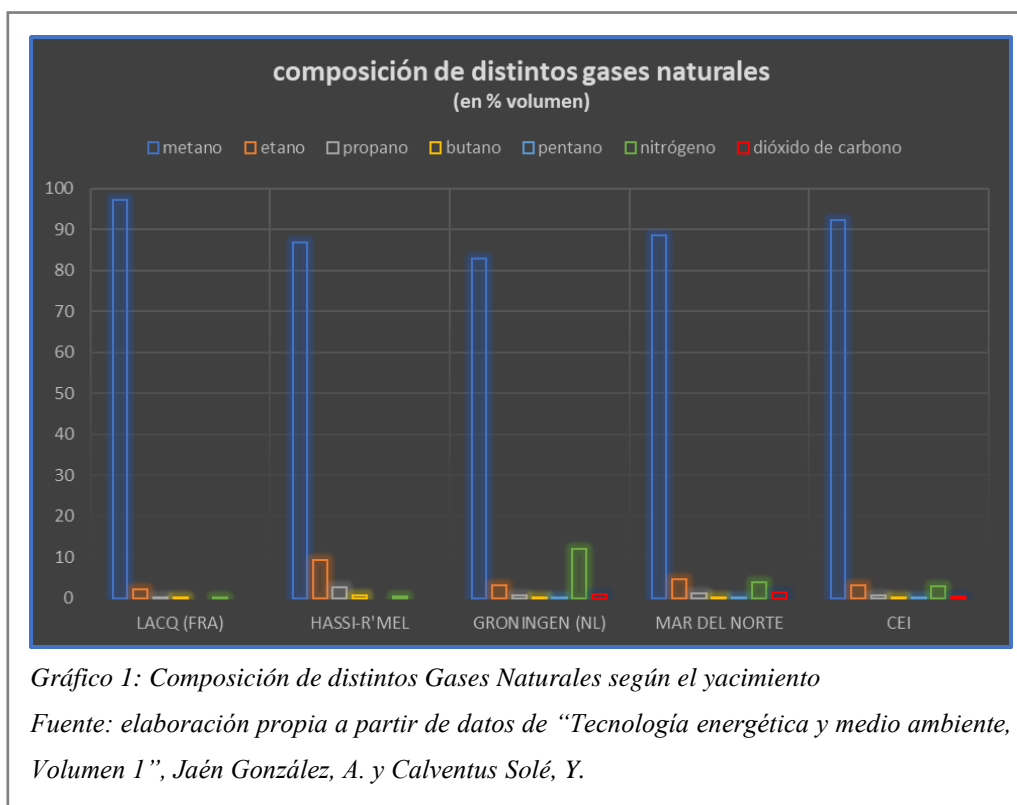
2.2.10.1 ¿Qué es el Gas Natural?

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos parafínicos, cuya composición es muy variable según el yacimiento explotado, pero en la cual domina siempre el metano, de fórmula CH_4 , que es el famoso grisú de las minas de carbón.

El gas se encuentra en estado seco, si no contiene hidrocarburos más pesados que el etano, o en estado húmedo, si, al contrario, contiene una cantidad notable de propano, butano, pentano, etc.

Numerosos yacimientos están constituidos por una mezcla de petróleo bruto y de gas “asociado”, extrayéndose este último, en estos casos, mediante separadores instalados en la cabeza del pozo.

La explotación de un yacimiento de gas natural suele ser más fácil que la de un yacimiento de petróleo, y se presta particularmente a la automatización de controles, de tratamientos, de regulaciones, y del control de las válvulas de los pozos y de las canalizaciones de recogida y almacenamiento. La presión en los yacimientos suele ser muy elevada, lo que permite, después del tratamiento, transportar el gas a gran distancia por los conductos, sin necesidad de instalar compresores.



2.2.10.2 Tratamiento del Gas Natural

Como primer paso, los gases húmedos deben ser desposeídos de los hidrocarburos demasiado pesados, como propano, butano, pentano, etc., mediante un tratamiento de desgasolinación, justificado no solo por la comercialización ventajosa de estos gases “licuados” como combustibles o carburantes, sino también porque podrían condensarse en las redes de distribución, o en las casas de los usuarios, creando condiciones de utilización muy peligrosas, como puede ser la llegada de líquido a los quemadores.

Del mismo modo, el vapor de agua debe ser eliminado al máximo, ya que da origen a la formación de hidratos, cuerpos compuestos por una asociación de metano y de agua, parecidos a la nieve o al hielo. Si se produjeran, por enfriamiento del gas natural al expansionarse a través de una válvula, circulando por un conducto submarino, los hidratos taponarían inmediatamente la canalización.

2.2.10.3 Reservas de Gas Natural

Según el informe anual de 2016 realizado por la Asociación Española del Gas (*Sedigas, 2016*) las reservas mundiales de gas natural disminuyeron un 1,8%.

Las reservas están altamente concentradas, y así la región de Oriente Medio cuenta con el 40% de las reservas mundiales probadas, seguida por la CEI con el 34%.

Durante la última década, las reservas probadas mundiales de gas natural crecieron en 22 billones de metros cúbicos. América del Norte y Asia también registraron un crecimiento significativo de las reservas. Por el contrario, Europa y África vieron como éstas disminuían.

2.2.10.4 Producción de Gas Natural

La producción mundial de gas natural comercializado creció un 1,6% en 2015.

Esta tasa de crecimiento es ligeramente superior a la del año 2014 (+ 1,3%), pero se mantuvo inferior a la media de los últimos diez años.

Al igual que ocurrió en 2014, la moderación del crecimiento del suministro de gas se explica por diversos factores ligados a la demanda: una intensa competencia con el carbón barato en los mercados industrializados y emergentes, el desarrollo de la energía nuclear y renovable, la mayor eficiencia energética, el débil crecimiento de la generación eléctrica y un contexto económico estancado.

2.2.10.5 Consumo de Gas Natural

Por lo que respecta a distribución de reservas, producción y consumo de gas natural, destaca una vez más el comportamiento de Norteamérica. Esta región mundial lidera la producción y el consumo, y supera ya el 27% del total. Oriente Medio y la CEI concentran más del 70% de las reservas a nivel mundial. A destacar también que Oriente Medio y Asia-Oceanía han incrementado ligeramente su producción respecto al año anterior.

Tabla 3: Distribución de reservas, producción y consumo mundial de gas natural (%)

Fuente: Sedigas, (2016)

	Reservas	Producción	Consumo
América del Norte	5,76	27,25	27,6
América Central y Sur	3,88	4,81	4,67
Europa	2,04	7,11	13,79
CEI	33,67	22,81	17,57
África	6,43	5,89	3,77
Oriente Medio	40,35	17,03	13,78
Asia-Oceanía	7,84	15,23	19,5
TOTAL MUNDIAL	100	100	100

2.2.10.6 Gas Natural Licuado (GNL)

La licuefacción, que reduce el volumen del gas hasta 600 veces, permite resolver simultáneamente las dos grandes dificultades de la industria del gas: el transporte y el almacenamiento.

La primera planta de gas natural licuado a nivel industrial se realizó en Arzew (Argelia), en el punto de la costa mediterránea al que llega el conducto de los yacimientos de Hassi-R'Mel: permitió comprobar la rentabilidad y la fiabilidad, no solo del procedimiento de licuefacción, sino también del de almacenamiento y transporte a -160°C, por el primer metanero, el “Jules Verne”, hasta El Havre, y la regasificación en destino.



*Ilustración 3: Metanero "Jules Verne" en terminal de Le Havre
(Fra)*

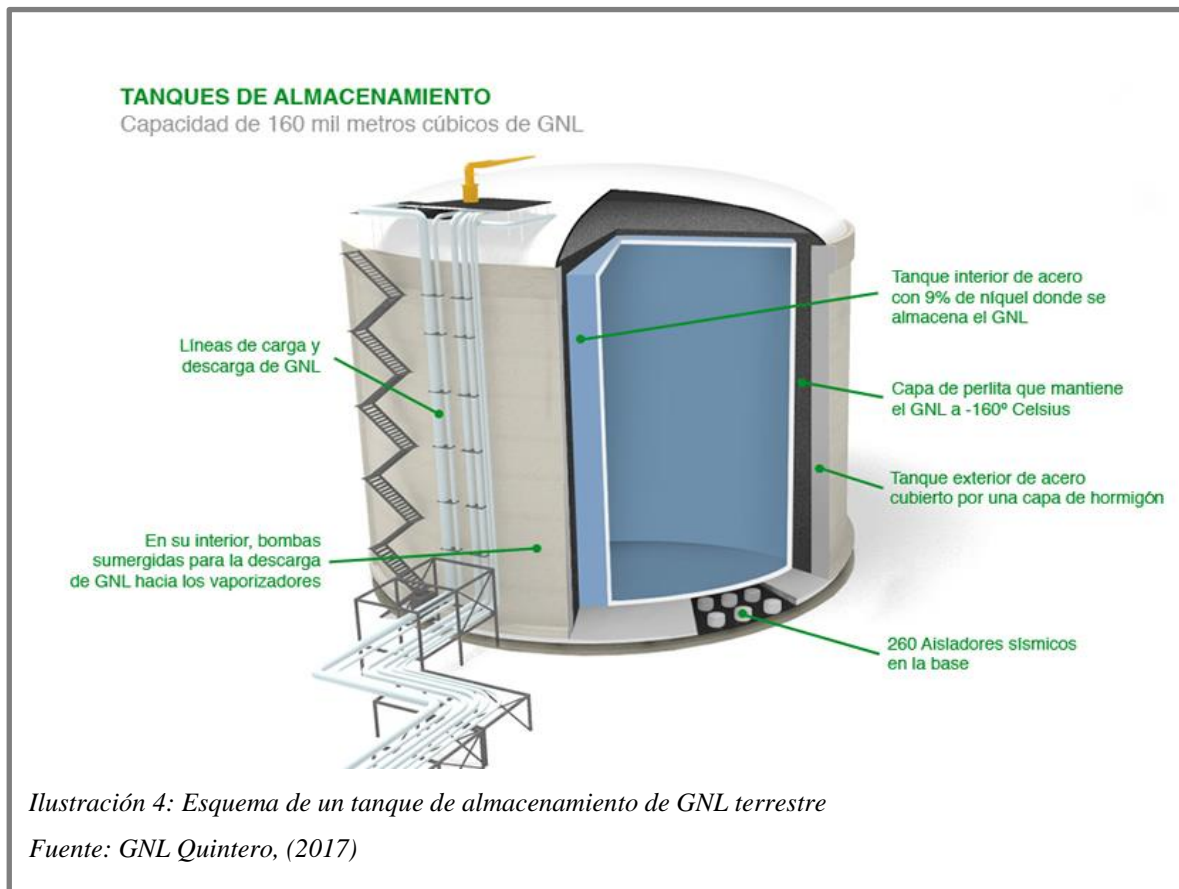
Fuente: www.marine-marchande.net

La licuefacción propiamente dicha se efectúa en tres pasos de enfriamiento progresivo, y el frío empleado proviene de la expansión de un hidrocarburo, más ligero en cada paso; por ejemplo, en la planta de Arzew I, el primer paso se efectúa con propano (-37°C), el segundo, con etileno (-100°C), y el tercero, con metano (-160°C).

2.2.10.7 Almacenamiento terrestre de GNL

Los tanques de almacenamiento de gas natural licuado terrestres pueden tener varios diseños, pueden ser de contención sencilla o simple, de contención doble y de contención completa o total. Estos últimos son los adoptados en instalaciones de almacenamiento de gas natural recientes a nivel mundial (*Gas Canarias S.A, 2017*).

El diseño de estos tanques consta de un tanque interior de acero inoxidable niquelado especialmente diseñado para soportar las extremadamente bajas temperaturas del GNL, que a su vez está recubierto por otro tanque cubierto exteriormente por hormigón armado, impermeable a los vapores de gas natural que se pudieran producir como consecuencia de una hipotética fuga en el tanque interior. Entre ambos tanques existe un espacio relleno con un material especialmente aislante (perlita) que mantiene el GNL a la temperatura de -160°C .



2.2.10.8 Transporte y almacenamiento de GNL en buques

Existen cinco tipos de tanques de almacenamiento y transporte de GNL empleados en barcos, todos ellos reflejados en el Código Internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuado a granel (Código CIG) emitido por la OMI (García Soutullo, R., 2016).

1. Tanques independientes (“A”, “B”, “C”)
2. Tanques de membrana (Technigaz/ Gaz transport)
3. Tanques de semi-membrana
4. Tanques integrales o estructurales (convencionales)
5. Tanques de aislamiento interno

Los tipos de tanques más utilizados actualmente en los buques gaseros son los tanques independientes y de membrana.

Tanques independientes

Los tanques independientes son autoportantes y no forman parte de la estructura del casco ni contribuyen a su resistencia. Podemos distinguir 3 tipos de tanques independientes diferenciados por la presión de proyecto de cada uno y su forma.

1) Tipo “A”: estos tanques son contruidos con acero aleado con níquel resistente a bajas temperaturas bajo cero. Poseen formas planas y prismáticas para aprovechar al máximo el espacio del casco. Este tipo de tanques está proyectado para gaseros que transportan cargas refrigeradas, por lo que es necesaria la incorporación de aislamiento y de una barrera secundaria. El espacio inter-barreras se llena de gas inerte o aire seco. La presión de trabajo de estos tanques es cercana a la atmosférica.

2) Tipo “B”: los tanques tipo “B” o tipo Moss Rosenberg son fácilmente reconocibles por sus formas de esfera. Este diseño particular no necesita una barrera secundaria completa, con una barrera parcial que cubra el plano bajo cubierta es suficiente, esto se traduce en una reducción de coste notable. Funcionan con presiones cercanas a la atmosférica.

3) Tipo “C”: se trata de recipientes a presión de forma cilíndrica o esférica diseñadas para soportar presiones de vapor superiores a 2 bar. Estos tanques pueden montarse de forma vertical u horizontal en función del diseño. Este tipo de tanques se pueden ver no solo para el transporte con objeto de venta, sino también en buques convencionales con objeto de almacenar LNG destinado a alimentar los motores de abordo.

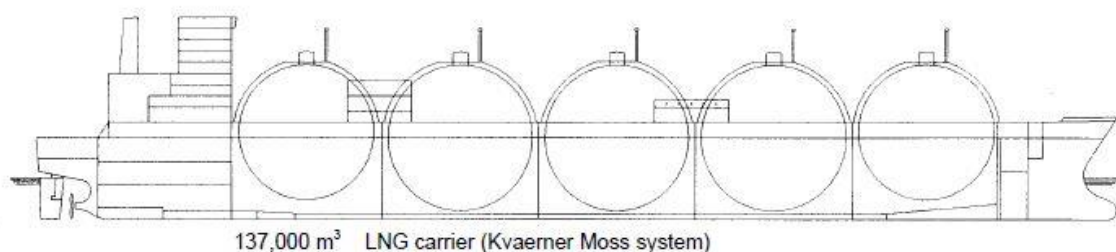


Ilustración 5: Perfil de la estructura de un buque gasero

Fuente: García Soutullo, R., (2016)

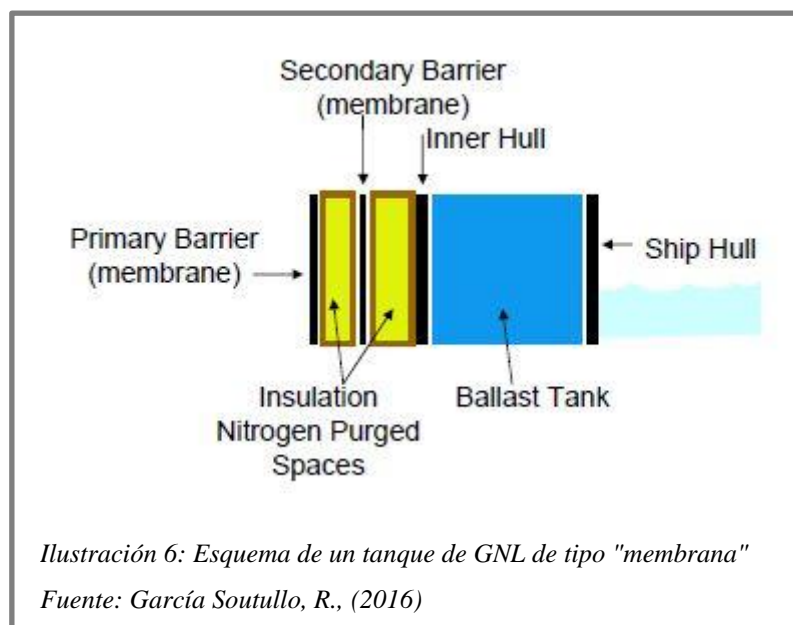
Tanques de membrana

El sistema de membrana de estos tanques se basa en la disposición de una fina barrera primaria (0,7 – 1,5 mm) como elemento de contención principal, esta primera barrera está recubierta de aislante y se soporta por el propio casco del buque.

Estos tanques están integrados en gran parte en el casco del buque, aunque no forman parte de este.

El sistema de membrana debe estar siempre apoyado de una barrera secundaria que asegure la integridad total, la barrera primaria está diseñada para compensar las dilataciones y contracciones térmicas, y las tensiones para evitar esfuerzos excesivos.

El espacio entre la barrera primaria y secundaria contiene nitrógeno a baja presión, mientras que en el espacio entre la barrera secundaria y el casco se inyecta nitrógeno a presión.



Dependiendo del diseño del buque, el volumen de carga, la zona de navegación y el tiempo de viaje, el grosor de las capas de aislante es modificable para determinar la cantidad de boil-off⁴ producido.

⁽⁴⁾Boil-off: El LNG se transporta a -160°C, cuando se producen variaciones térmicas que traspasan el aislamiento de los tanques y llegan a la carga, esta sube su temperatura, generando un gas evaporado (boil-off gas) que genera sobrepresiones en los tanques que deben ser aliviadas.

2.2.10.9 Motores marinos con GNL

Las principales casas constructoras de motores para uso marino están ampliando cada vez más sus fronteras, en este caso mejorando la tecnología para poder usar LNG como combustible a bordo. Actualmente, son dos los tipos de motores alimentados por LNG sobre los que más se está innovando, y más se están utilizando (*Marintek, 2008*):

- **Motores de gas Dual Fuel (DF)**
- **Motores de gas de combustión pobre y encendido por chispa (LBSI)**

Motores de gas Dual Fuel (DF)

Los motores de gas Dual Fuel se denominan de esta forma debido a que pueden funcionar con dos tipos de combustible, fuel líquido o gas natural.

Este tipo de motores posee la capacidad de poder cambiar de combustible sin interrumpir la generación de energía. Funcionan basados en el principio de combustión pobre, es decir, una mezcla entre los ciclos Otto y Diesel.

Se introduce una mezcla pobre de aire y gas en la cámara de combustión, y cuando el pistón llega a su punto más alto, al final de la carrera de compresión, se introduce una inyección piloto de combustible líquido que inicia la combustión.

Esta fórmula implica que la mezcla aire-gas contiene más aire de lo necesario para realizar la combustión, de forma que se aumenta la eficiencia y se reducen las emisiones de gases contaminantes.

La principal virtud de estos motores es, como su nombre indica, su capacidad para utilizar dos tipos de combustible distintos, esto se debe al desarrollo de un inyector de combustible que puede inyectar de dos maneras distintas, una de ellas es la inyección piloto que se usa en el modo gas, es una pequeña inyección de diésel suficiente para provocar la combustión de la mezcla de aire y gas. La otra, es una inyección de diésel al uso, siguiendo el funcionamiento de un motor diésel normal.

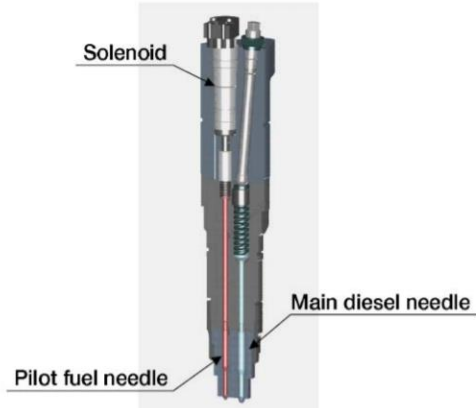
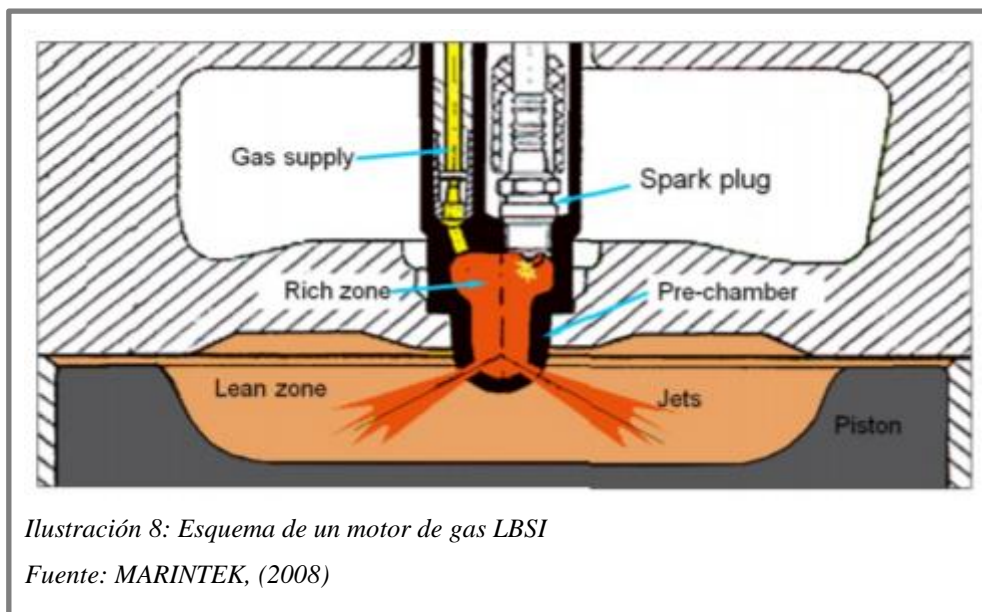


Ilustración 7: Esquema de un inyector doble usado en motores Dual Fuel
Fuente: Marintek, (2008)

Motores de gas de combustión pobre y encendido por chispa (LBSI)

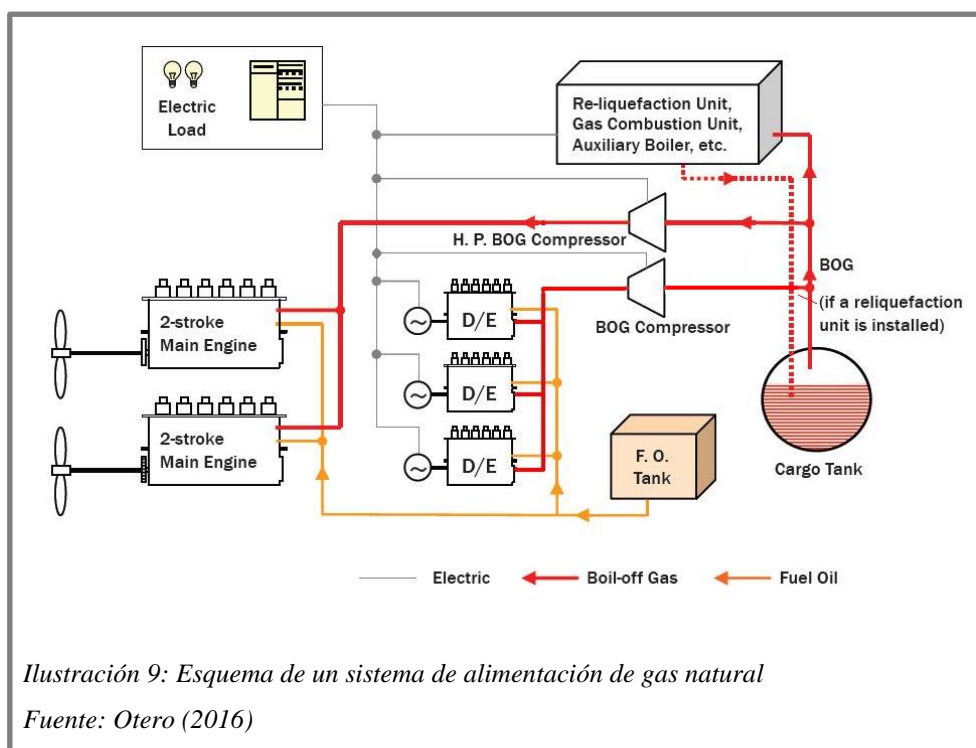
Son motores que siguen el ciclo Otto, quemando gas a baja presión. Estos motores incorporan una precámara antes de la cámara de combustión principal.

Su funcionamiento es el siguiente, se introduce una mezcla aire-gas pobre en la cámara de combustión principal, esta mezcla pobre asegura la alta eficiencia y la reducción de las emisiones de gases contaminantes, al igual que en la tecnología Dual Fuel. Durante la carrera de compresión, se introduce en la precámara una inyección de gas a una presión entre los 3 y los 5 bares, que se enciende por la chispa de la bujía, la combustión se propaga de la precámara a la cámara principal.



Alimentación del Gas natural

El gas natural utilizado como combustible en estos motores puede venir de dos fuentes, de tanques de almacenamiento de LNG para uso como combustible, o de tanques de almacenamiento de LNG utilizados para su transporte con fines comerciales, aprovechando el mencionado boil-off.



2.2.11 MÉTODOS SECUNDARIOS

Según la Directiva (UE) 2016/802 del Parlamento Europeo y del Consejo de mayo de 2016, “en el caso de utilizar sistemas de reducción de emisiones se deberá conseguir, de manera continua, una reducción al menos equivalente a la que se lograría con el uso de combustibles para uso marítimo con reducciones de azufre”.

Actualmente la alternativa a la utilización de combustibles con bajo contenido en azufre, o combustibles alternativos como el LNG, es la instalación de torres de lavado de gases a bordo, comúnmente llamadas “scrubbers”, que a su vez deben cumplir ciertas disposiciones establecidas para que sean válidas.

Existen dos tipos generales de scrubbers: de tipo seco o de tipo húmedo. Ambos tipos cumplen con los requerimientos del Anexo VI del MARPOL, sin embargo, las de tipo húmedo son las más utilizadas en la industria marítima (*Alfa Laval, 2017*).

2.2.11.1 Scrubber de tipo seco

Las scrubber de tipo seco fuerzan a los gases de escape a pasar a través de una base seca de hidróxido de calcio granulado (Ca(OH)_2). Aunque su instalación y funcionamiento sean simples, son menos comunes en la industria marítima. Esto es debido en parte a su gran consumo de Ca(OH)_2 granulado. Por si fuera poco, estas sustancias granuladas deben ser almacenadas en espacios interiores, lo que implica que debe haber espacios grandes a bordo para almacenarlos.

2.2.11.2 Scrubber de tipo húmedo

Las scrubber de tipo húmedo lavan los gases de escape forzándolos a pasar por líquido. En el caso de las scrubber para SO_x marinas, este líquido puede ser el agua de mar debido a su amplia y rápida disponibilidad, además de que es naturalmente alcalina. También se puede utilizar agua dulce mezclada con un aditivo alcalino (generalmente soda cáustica). Los componentes de los SO_x son absorbidos y convertidos en sustancias no dañinas, a su vez, gran parte de la materia particulada formada es atrapada por el líquido, evitando que salga a la atmósfera.

Los scrubber de tipo húmedo utilizados en la industria marítima pueden estar configurados según tres tipos de modos de funcionamiento. Están los de ciclo abierto con agua marina, los de ciclo cerrado con un sistema cerrado de circulación de agua, o los sistemas híbridos, capaces de funcionar bien con agua marina, bien con el agua en circulación.

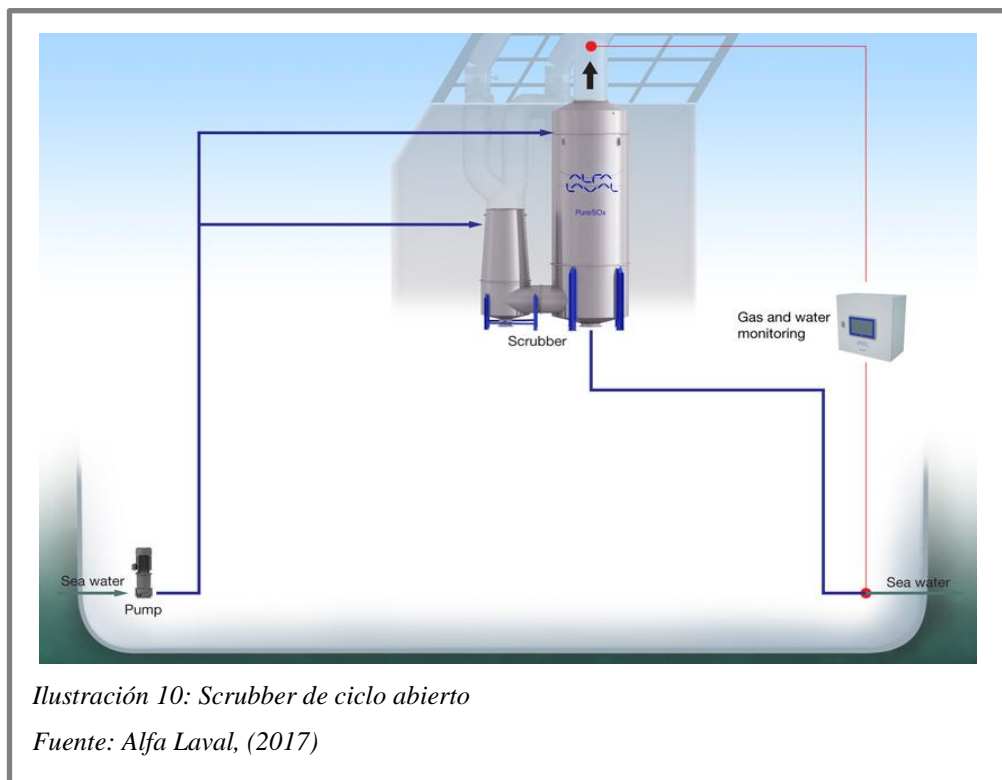
Scrubber de ciclo abierto

Los scrubber de ciclo abierto lavan los gases de escape directamente con agua de mar, la cual es legalmente descargada de nuevo al mar.

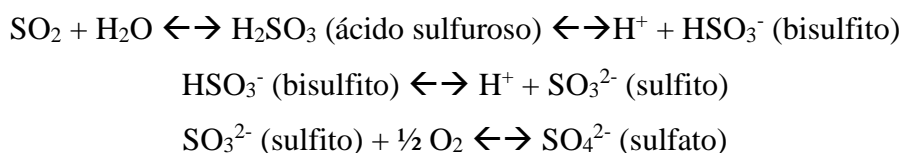
Este sistema implica el menor número de componentes, lo cual significa una inversión menor y una instalación más sencilla. Del mismo modo, los costes operativos son muy reducidos, puesto que no hay consumibles.

Sin embargo, los scrubber de ciclo abierto puede que no cumplan con las restricciones debido a las aguas con baja alcalinidad, como por ejemplo en el mar Báltico donde, cuanto más al norte se navegue, menos alcalinidad tendrá el agua. La capacidad de lavado de los scrubber de ciclo abierto es directamente proporcional a la alcalinidad del agua de mar. Es por esto que en zonas como el mar Báltico, puede que los scrubber no alcancen los niveles de lavado requeridos.

Para más inri, el uso de estos scrubber puede chocar con legislaciones locales sobre descargas al mar.



El lavado con agua de mar requiere que los gases de escape se mezclen con agua de mar para disolver los óxidos de azufre. Los fabricantes usan varias técnicas para lograr la mezcla sin obstruir excesivamente el paso del gas de escape, ya que esto podría provocar una "contrapresión" fuera de los límites del motor y afectar negativamente al funcionamiento del mismo. Los óxidos de azufre de los gases de escape de motores marinos típicamente consisten en alrededor del 95% de dióxido de azufre, SO_2 y el 5% restante de trióxido de azufre, SO_3 . Cuando se disuelve, se produce una reacción por la cual el dióxido de azufre se ioniza a bisulfito y sulfito, que luego se oxida fácilmente en sulfato en contacto con el agua de mar, que contiene oxígeno, (EGCSA, 2015).



La ionización a bisulfito y sulfito produce un exceso de iones de hidrógeno (H^+), es decir, acidez, al igual que el ácido sulfúrico formado a partir de trióxido sulfúrico. Esto será inicialmente neutralizado por la capacidad de amortiguamiento o alcalinidad del agua de mar, que se imparte principalmente por su contenido natural de bicarbonato. Sin embargo, una vez que se consume la capacidad de amortiguación inicial y el pH se reduce a aproximadamente 3, la ionización de azufre a sulfito es insignificante y la limpieza del gas de escape se vuelve limitada.

El flujo de agua de lavado de los sistemas de limpieza de gases de escape está optimizado de modo que el dióxido de azufre se puede disolver, y se dispone de una cantidad adecuada de capacidad de amortiguación para permitir que las emisiones se reduzcan al nivel requerido. Un flujo de agua de lavado muy reducido, o un nivel de alcalinidad inadecuado hacen que la reducción de SO_2 requerida no se cumpla, sin embargo, un flujo de agua de lavado demasiado grande es ineficiente en términos de potencia de bombeo y tamaño y peso de componentes. También se debe tener en cuenta la temperatura del agua de lavado, a menos temperatura, mejor solubilidad tendrá el SO_2 .

Los sulfatos son componentes naturales del agua de mar. Son solubles y tienen un largo "tiempo de residencia", así como tampoco se ven afectados por el pH natural, temperaturas y presiones de los océanos. Se puede decir que el sulfato es conservador como componente del agua de mar, puesto que independientemente de la salinidad total,

se produce mezclándose en cualquier océano en la misma proporción que otros constituyentes de estas aguas, como puede ser el sodio. La mayor parte de sulfatos del agua de mar se deriva de las actividades volcánicas y la desgasificación del fondo marino. Además, los sulfatos llegan a los océanos a través del caudal de los ríos, pero la concentración en el agua en mar abierto se mantiene constante, en torno a 2,65 g/l o 20 kg de azufre por tonelada de agua de mar. Por tanto, según estudios y ensayos de campo, se confirma que el aumento de sulfato procedente de los gases de escape será insignificante en comparación con la cantidad que ya hay en los océanos.

Scrubber de ciclo cerrado

Con este sistema se mitigan los problemas relacionados con el rendimiento y las descargas al mar de los sistemas de ciclo abierto.

El agua utilizada en estos sistemas lleva añadido un aditivo para la alcalinidad (generalmente sosa cáustica), y es recirculada.

Para evitar que el rendimiento del lavado descienda por la acumulación de impurezas tras la continua recirculación, una parte del agua en circulación es purificada, descargada y reemplazada por agua dulce periódicamente para mantener sus propiedades.

La alcalinidad del agua es controlada gracias a los aditivos, y las descargas al mar pueden evitarse durante grandes periodos de tiempo, sin embargo, estos sistemas incluyen un mayor número de componentes, como la unidad de purificación del agua, o la planta desalinizadora, además del coste de los aditivos de alcalinidad.

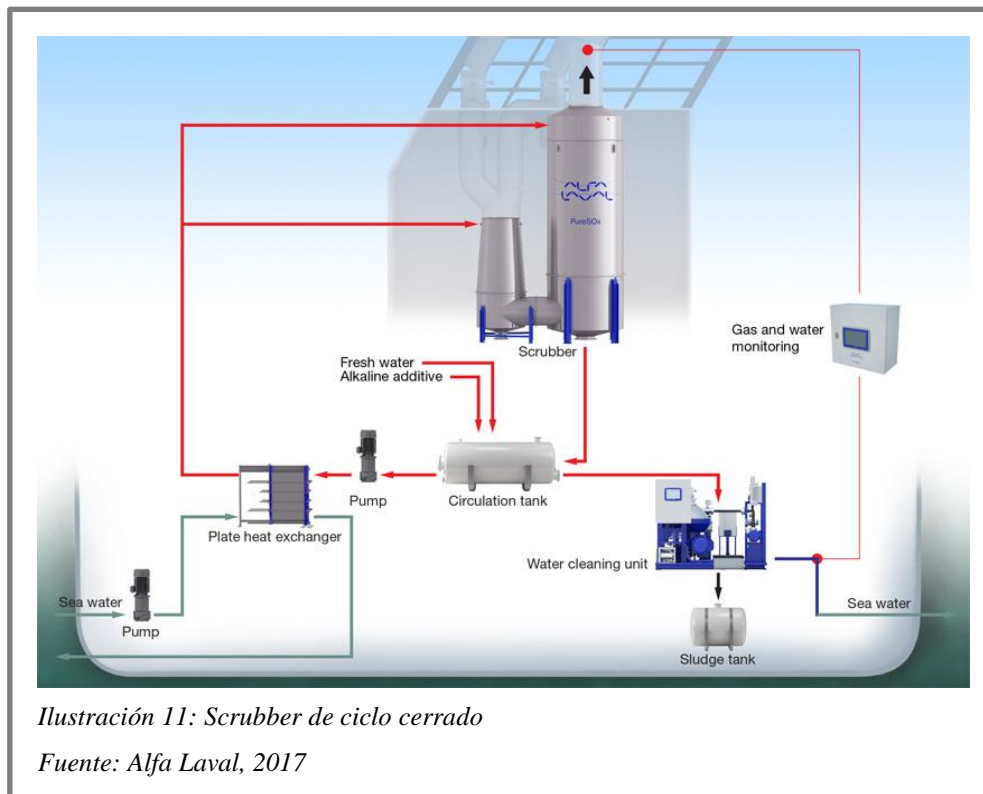
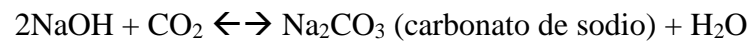
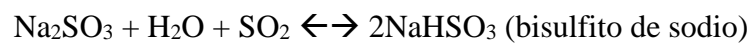
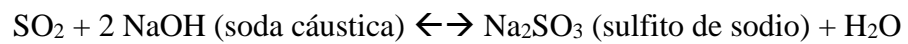


Ilustración 11: Scrubber de ciclo cerrado

Fuente: Alfa Laval, 2017



Scrubber de ciclo híbrido

Los sistemas híbridos mezclan el bajo coste de los sistemas de ciclo abierto con la seguridad operacional de los sistemas de ciclo cerrado. Ambos sistemas están incluidos en este modelo, pudiendo cambiar de uno a otro rápidamente.

La ventaja de estos sistemas radica en que, normalmente se usa en ciclo abierto para abaratar costes, y cuando la situación lo requiera, se cambia a ciclo cerrado. De este modo se podrán usar combustibles con alto contenido en azufre de manera continuada respetando restricciones locales para con las descargas de agua de lavado de los ciclos abiertos, o mitigar las bajadas de rendimiento relacionadas con la alcalinidad.

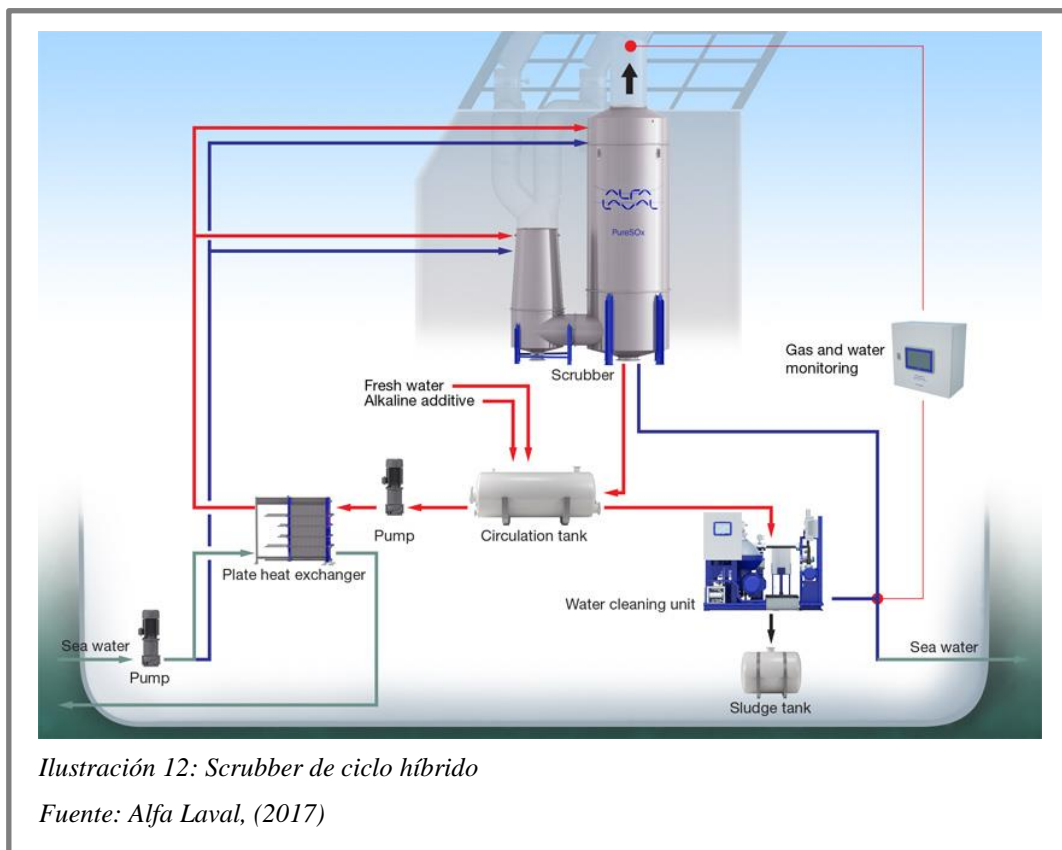


Ilustración 12: Scrubber de ciclo híbrido

Fuente: Alfa Laval, (2017)

También se pueden clasificar las scrubbers de tipo húmedo según la forma de la misma scrubber. En este caso, la elección dependerá del diseño del buque, puesto que las scrubber van colocadas en la parte superior del buque, justo antes de las chimeneas.

Diseños en U o divididos

La mayoría de las scrubber de tipo húmedo tienen un diseño en U, también llamado dividido por la traducción del inglés de “split”, en estos diseños la torre está dividida en dos recipientes, el “jet”, y el “absorbedor”, los gases entran por la parte superior del jet gracias a su forma, que genera efecto venturi, y pasan por una primera pantalla de agua, a continuación ascienden por el absorbedor donde hay una segunda barrera líquida formada por cortinas de agua, para finalmente salir por la chimenea.

Debido a su diseño en U, la scrubber necesita más espacio, sin embargo, su diseño es más simple. Además, la conexión entre ambas partes forma una trampa de agua natural que protege al motor de los retornos de agua.

Diseños en línea

En estos scrubbers, el absorbedor está colocado directamente encima del jet, es decir, ambas partes están integradas sin conexiones intermedias.

Este diseño es especialmente útil en barcos con poco espacio en la parte de las chimeneas, o con necesidades en cuanto a la estabilidad, como pueden ser los barcos de pasaje o los RoPax⁵.

Por contraposición a la, a priori, simpleza de su diseño, este tipo de scrubber son más complejos. Se debe tener especial cuidado y crear una trampa de agua para proteger al motor de los retrocesos.

Además, la scrubber sufrirá esfuerzos mayores en sus materiales por el calentamiento y refrigeración durante arranques y paradas respectivamente.

⁽⁵⁾Buques RoRo: Acrónimo del término inglés Roll On-Roll Off, con el que se denomina a los buques que transportan carga rodada. Si además transportan pasajeros, se denominan RoPax, o simplemente ferries (*Stock Logistic Transport SL, 2016*).

2.2.11.3 Planes para la legalidad de los scrubber

En el Anexo VI del MARPOL, concretamente en el MEPC.184(59) de 2009, se establecen una serie de directrices para dar de paso los sistemas de limpieza de los gases de escape (LGE), o scrubbers (MEPC, 2009).

En esta resolución se acuerda que los sistemas LGE podrán ser aprobados siempre que se realicen, o bien comprobaciones periódicas de las emisiones y parámetros, o bien si el sistema vaya provisto de un dispositivo de vigilancia continua de las emisiones.

Como método de vigilancia de las emisiones, puede utilizarse como referencia la relación SO_2 (ppm⁶) / CO_2 (%).

Siguiendo este método se han establecido unos valores de emisión correspondientes a cada límite del contenido de azufre del combustible:

Tabla 4: Relación contenido de azufre / emisiones

Fuente: MEPC, (2009)

Contenido de azufre del fueloil (% m/m)	Relación de emisiones SO_2 (ppm) / CO_2 (% v/v)
4,50	195,00
3,50	151,70
1,50	65,00
1,00	43,30
0,50	21,70
0,10	4,30

Nota: Los límites de las relaciones de emisiones sólo se aplican cuando se utilicen combustibles destilados o fueloil residuales derivados del petróleo.

⁶Ppm: Partes por millón, es una unidad de medida de concentración. Se refiere a la cantidad de unidades de la sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto (“Partes por millón (ppm), Química II).

Las Directrices establecidas en esta resolución permiten dos planes para certificar y verificar los sistemas LGE: el Plan A (Certificación de la unidad mediante comprobaciones de los parámetros y emisiones) y el Plan B (Vigilancia continua de las emisiones mediante comprobaciones de los parámetros).

Estas se aplican a todas las unidades de lavado de gases de escape instaladas a bordo en máquinas que consuman fueloil, excluidos los incineradores de a bordo.

Plan A

El funcionamiento del sistema LGE es inicialmente verificado y certificado. Esto va seguido de inspecciones periódicas, que pueden ser mediante un sistema de monitorización continuo de los gases de escape, o si no se dispone de dicho sistema.

Las opciones del plan A incluyen:

1. Aprobación de la unidad;
2. Unidades fabricadas en serie;
3. Aprobación de la gama de productos.

1. Aprobación de la unidad

Una unidad LGE debería certificarse como apta para satisfacer tanto el valor límite (el valor certificado) que especifique el fabricante (es decir, el nivel de emisión que la unidad puede alcanzar de manera continua) con un fueloil que cumpla el contenido máximo de azufre en % masa/masa especificado por el fabricante, y para la gama de los parámetros de funcionamiento para los que ha de aprobarse.

2. Aprobación de la gama de productos

En el caso de las unidades LGE nominalmente análogas y con los mismos caudales máxicos que se certifican en virtud de lo establecido en el apartado de aprobación, y para evitar que cada unidad LGE se someta a prueba, el fabricante del equipo puede presentar una conformidad de acuerdo de producción para que la acepte la Administración. En virtud de este acuerdo, la certificación de cada unidad LGE debería estar sujeta a todos los reconocimientos que la Administración considere necesarios para asegurarse de que el valor de las emisiones procedentes de cada unidad LGE no es superior al valor certificado cuando dicho sistema funciona de conformidad con los parámetros aprobados.

3. Aprobación de la gama de productos

En el caso de una unidad LGE que tenga un proyecto idéntico, pero distintas capacidades de caudal másico máximo de los gases de escape, la Administración puede aceptar que, en lugar de someter a prueba todas las capacidades de las unidades LGE, los ensayos de dichos sistemas de limpieza se realicen con referencia a tres capacidades distintas, siempre y cuando estos ensayos se lleven a cabo a intervalos que incluyan los índices de capacidad más alto y más bajo de la gama y uno intermedio.

A fin de cumplir lo prescrito en el Plan A, ya sea antes o después de la instalación a bordo, debería certificarse que cada unidad LGE se ajusta al valor certificado que especifique el fabricante (es decir, el nivel de emisión que la unidad puede alcanzar de manera continua) en las condiciones de funcionamiento y con las restricciones que figuran en el Manual técnico LGE (ETM-A) que haya aprobado la Administración.

Cada unidad LGE debería disponer de un ETM-A facilitado por el fabricante, en el que se especifiquen la identificación de la unidad, una descripción de la misma y los sistemas auxiliares necesarios, límites de funcionamiento, prescripciones o restricciones sobre su funcionamiento óptimo, prescripciones sobre el mantenimiento o ajuste de la unidad, y otras prescripciones que puedan servir de ayuda ante un funcionamiento incorrecto.

Límites de las emisiones

1. Cada unidad LGE debería ser apta para reducir las emisiones y que éstas sean iguales o inferiores al valor certificado en cualquier punto de carga cuando se esté funcionando de conformidad con los criterios especificados en el manual ETM-A.
2. Las unidades LGE instaladas en los motores propulsores principales diésel deberían satisfacer lo prescrito en el apartado 1 en todas las cargas que se encuentren entre el 25 % y el 100 % de toda la gama de carga de dichos motores.
3. Las unidades LGE instaladas en los motores auxiliares diésel deberían satisfacer lo prescrito en el apartado 1 en todas las cargas que se encuentren entre el 10 % y el 100 % de la gama de carga de dichos motores.

4. Las unidades LGE instaladas en motores diésel utilizados con fines de propulsión y como motores auxiliares deberían satisfacer lo prescrito en el apartado 3.
5. Las unidades LGE instaladas en calderas deberían satisfacer lo prescrito en el apartado 1 en todas las cargas que se encuentren entre el 10 % y el 100 % de la gama de carga (régimen de vaporización) o, si el margen de regulación es inferior, por encima de la gama de carga real de las calderas.

Para demostrar el rendimiento, deberían medirse las emisiones en cuatro puntos de carga como mínimo, contando con el consentimiento de la Administración.

- Un punto de carga se situará en el 95-100 % del caudal másico máximo del gas de escape para el que se certificará la unidad.
- Un punto de carga se situará entre el ± 5 % del caudal másico mínimo del gas de escape para el que se certificará la unidad.
- Los dos puntos de carga restantes se espaciarán por igual entre los caudales másicos máximo y mínimo del gas de escape.
- Cuando existan discontinuidades en el funcionamiento del sistema, debería aumentarse el número de puntos de carga, con el consentimiento por parte de la Administración, de modo que se demuestre que se conserva el funcionamiento requerido en la gama establecida de caudal másico del gas de escape.

Plan B

El funcionamiento del sistema LGE no está verificado. En su lugar, las emisiones se monitorean de manera continua para mostrar que el sistema cumple las disposiciones. El presente Plan debería utilizarse para demostrar que las emisiones procedentes de una unidad de combustión de fueloil equipada con un sistema LGE presentarán, con dicho sistema funcionando, el valor de emisión prescrito o uno inferior en cualquier punto de carga, incluida la fase de transición.

1. Aprobación

Cumplimiento demostrado durante el servicio mediante vigilancia continua de los gases de escape. El sistema de vigilancia debería ser aprobado por la Administración, y ésta debería poder disponer de los resultados de la vigilancia cuando sea necesario para demostrar el cumplimiento prescrito.

2. Reconocimiento y certificación

El sistema de vigilancia del sistema LGE debería estar sujeto al reconocimiento en la instalación y a los reconocimientos iniciales, anuales/intermedios y de renovación por parte de la Administración.

De conformidad con la regla 10 del Anexo VI del Convenio MARPOL, los sistemas de vigilancia de las unidades LGE también pueden ser objeto de inspección en el marco de la supervisión por el Estado rector del puerto.

3. Cálculo del régimen de emisiones

La composición de los gases de escape en términos de SO_2 (ppm) / CO_2 (%) debería medirse en un lugar adecuado que se encuentre después de la unidad LGE.

Las concentraciones de SO_2 (ppm) y CO_2 (%) deben vigilarse en todo momento y se introducirán en un dispositivo de registro y procesamiento de datos.

Si se utiliza más de un analizador para determinar el cociente SO_2 / CO_2 , deberían ajustarse para que tengan tiempos de muestreo y de medición similares, y los datos alinearse de modo que el cociente SO_2 / CO_2 sea plenamente representativo de la composición de los gases de escape.

Cada unidad LGE debería disponer de un ETM-B facilitado por el fabricante, en el que se especifiquen la identificación de la unidad, una descripción de la misma y los sistemas auxiliares necesarios, límites de funcionamiento, prescripciones o restricciones sobre su funcionamiento óptimo, prescripciones sobre el mantenimiento o ajuste de la unidad, y otras prescripciones que puedan servir de ayuda ante un funcionamiento incorrecto.

Manual de Vigilancia de a Bordo (OMM)

La elaboración del OMM debería abarcar la unidad LGE instalada junto con el equipo de combustión de fueloil que tengan que ser identificados y para los cuales haya que demostrar el cumplimiento.

En el OMM se deberían incluir, como mínimo, los siguientes aspectos:

- los sensores que han de utilizarse para evaluar el rendimiento del sistema LGE y la vigilancia del agua de lavado, así como las prescripciones relativas a su servicio, mantenimiento y calibración;
- los puestos desde donde se realizarán las mediciones de las emisiones de los gases de escape y la vigilancia del agua de lavado, junto con los datos relativos a todos los servicios auxiliares que resulten necesarios, como por ejemplo líneas de trasvase de muestras y unidades de tratamiento de muestras, además de todas las prescripciones que guarden relación con el servicio y el mantenimiento;
- los analizadores que vayan a ser utilizados, así como las prescripciones relativas a su servicio, mantenimiento y calibración;
- los procedimientos de calibrado y de calibración de fondo de escala del analizador; y
- otros datos o información pertinentes para el correcto funcionamiento del sistema de vigilancia o su utilización con el fin de demostrar el cumplimiento.

Plan de cumplimiento de las emisiones de SO_x (SECP)

Con objeto de cumplir lo prescrito en las reglas 14.1 y 14.4 del Anexo VI del Convenio MARPOL, todos los buques que vayan a utilizar una unidad LGE, en parte o en su totalidad, deberían contar con un SECP aprobado por la Administración.

De acuerdo con el Plan A, el SECP debería presentar datos de vigilancia continua que demuestren que los parámetros se mantienen dentro de los límites de las especificaciones recomendadas por el fabricante. Con el Plan B, esto se demostraría utilizando registros diarios de parámetros clave.

De acuerdo con el Plan B, el SECP debería detallar cómo la vigilancia continua de las emisiones de los gases de escape demostrará que el cociente total SO₂ (ppm) / CO₂ (%) del buque es equiparable a lo establecido en las reglas 14.1 y/o 14.4 o a un valor inferior, como el prescrito en la figura 16. Con el Plan A, esto se demostraría utilizando registros diarios de las emisiones de los gases de escape.

Criterios de descarga del agua de lavado

Cuando el sistema LGE se utilice en puertos o estuarios, la vigilancia y el registro del agua de lavado deberían ser continuos. Se debería hacer una vigilancia y registro de los valores de pH, PAH, turbidez y temperatura. El equipo de vigilancia y registro continuo debería estar en funcionamiento siempre que esté activado el sistema LGE, salvo durante breves periodos de mantenimiento y limpieza del equipo. El agua de lavado debería cumplir los límites siguientes:

- **pH.** El pH del agua de lavado debería cumplir una de las siguientes prescripciones:
 1. El pH del agua de lavado no debería ser inferior a 6,5 al descargarse en el mar con la excepción de que, durante maniobras y en tránsito, se permita una diferencia máxima de 2 unidades entre el pH de entrada y el de salida.
 2. Al poner en servicio la(s) unidad(es) tras instalarlas, se debería medir la pluma que forma el agua de lavado descargada desde fuera del buque (estacionario en el puerto) y se registrará el pH del agua descargada en el punto de medición del buque cuando el pH en la pluma, a 4 metros del punto de descarga, sea de 6,5 o superior. El pH del agua de descarga que alcance un valor mínimo de 6,5 será el límite de pH del agua descargada en el mar.

- **Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH).** La concentración de PAH en el agua de lavado debería cumplir las siguientes prescripciones:
 1. La concentración máxima continua de PAH en el agua de lavado no debería ser superior a 50 µg/L de PAHphe (fenantreno equivalente) por encima de la concentración de PAH del agua de entrada. A los efectos del presente criterio, la concentración de PAH en el agua de lavado debería medirse en el efluente del equipo de tratamiento del agua, pero antes de la dilución del agua de lavado o de otra unidad de dosificación de reactivos que pueda utilizarse previamente a la descarga.
 2. El límite de 50 µg/L indicado supra es el normalizado para un caudal de agua de lavado a través de la unidad LGE de 45 t/MWh, donde MW hace

referencia al régimen continuo máximo (MCR) o el 80 % de la potencia de la unidad de combustión de fueloil. Dicho límite debería ajustarse al alza para caudales de agua de lavado inferiores por MWh, y viceversa, de conformidad con el cuadro que figura a continuación.

Tabla 5: Relación entre concentración PAH y caudal

Fuente MEPC, (2009)

Caudal (t/MWh)	Límite de la concentración de la descarga ($\mu\text{g/L}$ de PAH_{phe} equivalente)	Tecnología de medición
0 - 1	2250	Luz ultravioleta
2,5	900	Luz ultravioleta
5	450	Fluorescencia
11,25	200	Fluorescencia
22,5	100	Fluorescencia
45	50	Fluorescencia
90	25	Fluorescencia

3. Durante un intervalo de 15 minutos en un periodo cualquiera de 12 horas, el límite de concentración continua de PAH_{phe} podrá superar el límite indicado supra en hasta un 100 %. Esto permitiría una puesta en marcha anómala de la unidad LGE.

⁽⁷⁾Fenantreno: Hidrocarburo aromático, derivado del benceno, sólido, cristalino, incoloro y de olor característico, que se emplea en la síntesis de medicamentos y colorantes, y en la estabilización de explosivos (www.lahistoriaconmapas.com).

➤ **Nitratos**

El sistema de tratamiento del agua de lavado debería impedir la descarga de nitratos que no sea la vinculada a una eliminación del 12 % de los NO_x de los gases de escape o la concentración normalizada de 60 mg/l para un índice de descarga del agua de lavado de 45 toneladas/MWh, si este valor es superior.

En todos los sistemas deberían hacerse pruebas para la detección de nitratos en el agua de lavado. Si las cantidades de nitratos están habitualmente por encima del 80 % del límite superior, deberían registrarse en el ETM-A o en el ETM-B.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DISPONIBLES

Las principales opciones que los armadores tienen para cumplir con los límites de emisiones de SO₂ son, como se ha descrito anteriormente, el uso de fuel con bajo contenido de azufre, utilizar gas natural licuado como combustible, o la instalación de sistemas de lavado de gases de escape o scrubbers. Todas las opciones tienen sus ventajas y sus inconvenientes, y cada barco tiene a su vez unas características, por lo tanto, para tomar una decisión con respecto al método a utilizar, sería necesario llevar a cabo un estudio sobre la viabilidad de cada opción.

2.3.2 USO DE COMBUSTIBLE CON BAJO CONTENIDO EN AZUFRE

2.3.2.1 Tipos de combustibles marinos

Los combustibles para uso marítimo pueden diferenciarse, según su procedencia, en fuel oil (IFO), gasoil (MGO) o diésel marino (MDO), (*de Manuel López F., 2006*).

Combustible residual: Es el residuo que se obtiene del proceso de refinado del crudo en refinerías. Se trata del producto de mayor viscosidad que queda después de extraer la gasolina, gasóleo, propano, butano, nafta, aceites lubricantes, etc.

Dentro de los combustibles residuales podemos encontrar el Marine Fuel Oil (MFO), son los denominados fueles pesados, se diferencian según su contenido en azufre y su viscosidad, los más usados son el MFO 380cst⁸, y el MFO 180.

También existen los fueles intermedios o IFO, que se obtienen mezclando fuel con destilados (gasóleos o diésel). Los IFO más utilizados son el IFO 380, y el IFO 180. Se utilizan como combustibles en motores marinos, y también en calderas de vapor.

Combustibles destilados: Son los llamados MGO (gasoil marino) y MDO (diésel marino). El MGO es más ligero y de más calidad, por lo tanto, más caro.

El MGO está destinado a alimentar los motores principales de pequeñas embarcaciones, buques de guerra y principalmente, a los motores auxiliares de generación de energía en buques mercantes.

El MDO tiene un uso parecido al MGO, pero con una exigencia mayor.

Clasificación según Norma ISO

Los tipos de combustibles marinos más utilizados por el sector son el MGO, el MDO, y los IFO 180 e IFO 380, que se corresponden con los siguientes grados ISO:

- **MGO se corresponde con DMA**

Tabla 6: Especificaciones ISO 8217 DMA

Fuente: ISO 8217 (2017)

Especificaciones para fueles marinos destilados / ISO 8217 2017	DMA
Densidad a 15 °C (kg/m ³) max	890,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) min	2,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) max	6,0
Punto de inflamación (°C) min	60,0
Punto de congelación (°C) invierno	-6,0
Punto de congelación (°C) verano	0,0
Residuo carbonoso (%m/m) max	
Cenizas (%m/m) max	
Agua (% V/V) max	
Azufre (%m/m) max	1,0
Sedimento total (%m/m) max	
Sulfídrico (mg/kg) ax	2,0
Índice cetano min	40,0

- **MDO se corresponde con DMB**

Tabla 7: Especificaciones ISO 8217 DMB

Fuente: ISO 8217 (2017)

Especificaciones para fueles marinos destilados / ISO 8217 2017	DMB
Densidad a 15 °C (kg/m ³) max	900,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) min	2,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) max	11,0
Punto de inflamación (°C) min	60,0
Punto de congelación (°C) invierno	0,0
Punto de congelación (°C) verano	6,0
Residuo carbonoso (%m/m) max	0,30
Cenizas (%m/m) max	0,010
Agua (% V/V) max	0,30
Azufre (%m/m) max	1,50
Sedimento total (%m/m) max	
Sulfídrico (mg/kg) ax	2,0
Índice cetano min	35,0

- **IFO 180 se corresponde con RME 180 y RMG 180**

Tabla 8: Especificaciones ISO 8217 RME 180 y RMG 180

Fuente: ISO 8217 (2017)

Especificaciones para fueles marinos residuales / ISO 8217 2017	RME 180	RMG 180
Densidad a 15 °C (kg/m ³) max	991,0	991,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) max	180,0	180,0
Vanadio (mg/kg) max	150,0	350,0
Punto de inflamación (°C) min	60,0	60,0
Punto de congelación (°C) invierno	30,0	30,0
Punto de congelación (°C) verano	30,0	30,0
Residuo carbonoso (%m/m) max	15,0	18,0
Cenizas (%m/m) max	0,070	0,10
Agua (% V/V) max	0,50	0,50
Azufre (%m/m) max	3,50*	3,50*
Sedimento total (%m/m) max	0,10	0,10
Sulfídrico (mg/kg) ax	2,0	2,0
Índice cetano min		
Aluminio más sílice (mg/kg) max	50,0	60,0

* Límite establecido hasta enero de 2020, a partir de entonces, el límite será de 0.50.

- **IFO 380 se corresponde con RMG 380 y RMK 380**

Tabla 9: Especificaciones ISO 8217 RMG 380 y RMK 380

Fuente: ISO 8217 (2017)

Especificaciones para fueles marinos residuales / ISO 8217 2017	RMG 380	RMK 380
Densidad a 15 °C (kg/m ³) max	991,0	1010,0
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s) max	380,0	380,0
Vanadio (mg/kg) max	350,0	450,0
Punto de inflamación (°C) min	60,0	60,0
Punto de congelación (°C) invierno	30,0	30,0
Punto de congelación (°C) verano	30,0	30,0
Residuo carbonoso (%m/m) max	18,0	20,0
Cenizas (%m/m) max	0,10	0,150
Agua (% V/V) max	0,50	0,50
Azufre (%m/m) max	3,50*	3,50*
Sedimento total (%m/m) max	0,10	0,10
Sulfídrico (mg/kg) ax	2,0	2,0
Índice cetano min		
Aluminio más sílice (mg/kg) max	60,0	60,0

* Límite establecido hasta enero de 2020, a partir de entonces, el límite será de 0.50.

2.3.2.2 Variaciones del precio de los combustibles marino

Los precios de los combustibles marítimos que se expondrán a continuación, son una media del precio mundial comprendida entre noviembre de 2016 hasta noviembre de 2017, están definidos en \$/tonelada.

IFO 380



Gráfico 2: Variación del precio IFO 380

Fuente: Bunkerworld (2017)

IFO 180



Gráfico 3: Variación del precio IFO 180

Fuente: Bunkerworld (2017)

MDO



Gráfico 4: Variación del precio MDO

Fuente: Bunkerworld (2017)

MGO

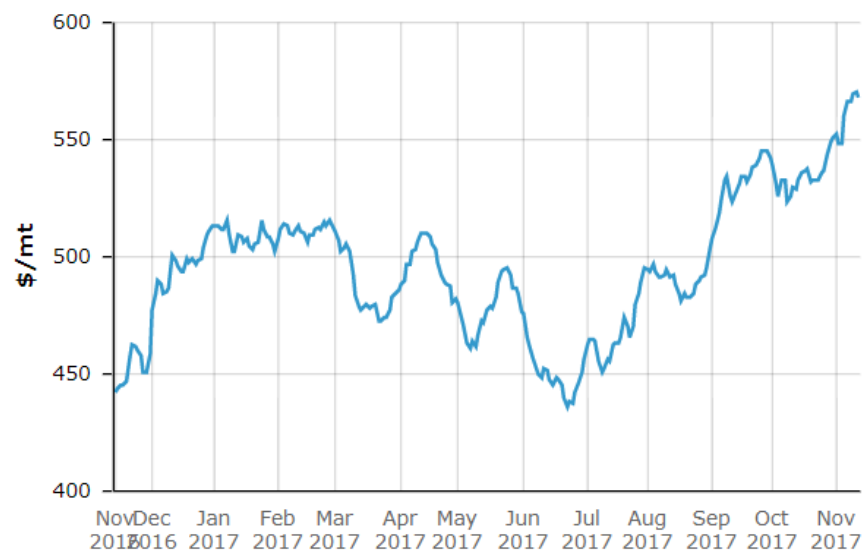


Gráfico 5: Variación del precio MGO

Fuente: Bunkerworld (2017)

El precio de los combustibles marinos IFO, MDO y MGO, como se ve en las gráficas, ha sufrido una subida de alrededor de 100\$ por tonelada durante el último año.

Además, cuando el límite de 0.5% de azufre se alcance, el precio del fuel se incrementará de nuevo, de modo que, los costes de explotación de los buques también aumentarán. Este dato a su vez, hará que se incremente el precio de los productos transportados, o los viajes ofertados.

A continuación, se puede ver un cuadro en el que se muestra (*Ministry of Transport and Communications, 2009*):

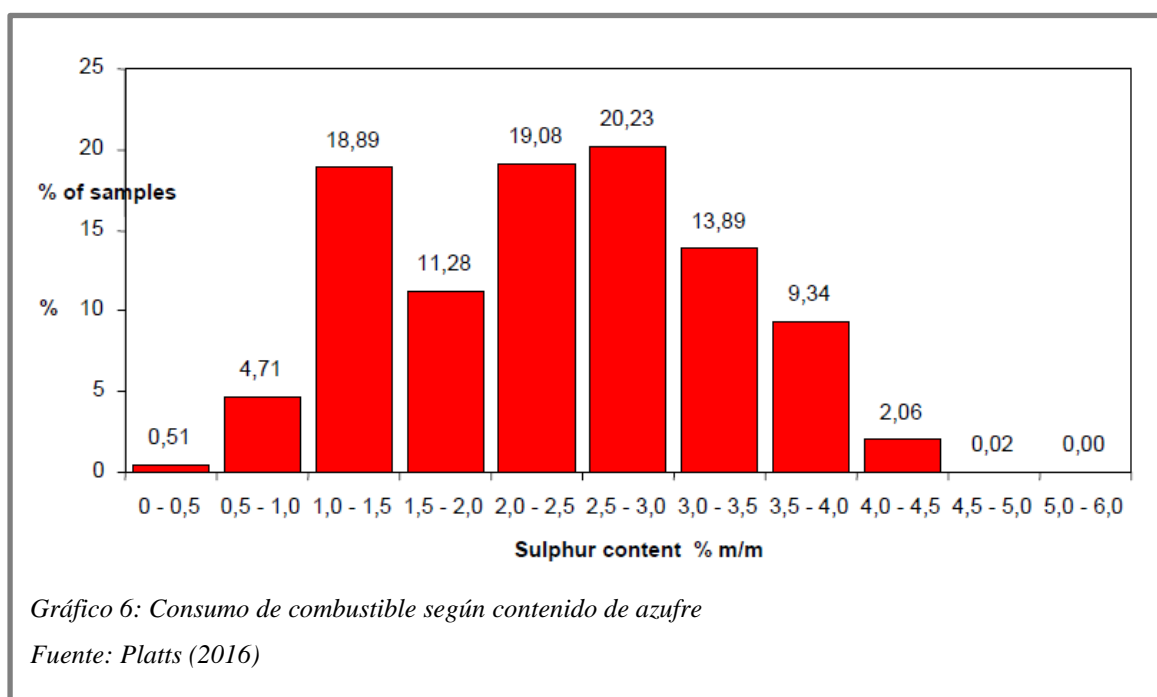
- el incremento del coste de explotación del buque por día navegado,
- el coste adicional en combustible por día navegado,
- el coste del combustible por tonelada de carga y por día navegado,
- y el incremento del coste de explotación del buque por tonelada de carga y por día navegado.

Vessel type	Fuel costs € per travel day	Percentage increase	Vessel costs € per travel day	Percentage increase	Fuel costs €/TEU per travel day	Percentage increase	Vessel costs €/TEU per travel day	Percentage increase
Container vessels	24,200		36,000		15.62		23.24	
- Heavy fuel oil 1%	25,900-29,400	7 - 22 %	37,700-41,200	5 - 15 %	16.64 - 18.78	6 - 20 %	24.21 - 26.29	4 - 13 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	27,200-31,200	12 - 29 %	39,000-43,000	8 - 20 %	17.44 - 19.84	12 - 27 %	24.99 - 27.33	8 - 18 %
- Light fuel oil 0.1 %	41,900-44,600	73 - 84 %	53,700-56,400	49 - 57 %	26.20 - 27.78	68 - 78 %	33.56 - 35.12	44 - 51 %
Container feeder vessels	15,081		23,184		12.73		19.56	
- Heavy fuel oil 1%	16,100-18,400	7 - 22 %	24,200-26,500	5 - 14 %	13.61 - 15.49	7 - 22 %	20.45 - 22.32	5 - 14 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	17,000-19,500	12 - 29 %	25,100-27,600	8 - 19 %	14.31 - 16.42	12 - 29 %	21.15 - 23.26	8 - 19 %
- Light fuel oil 0.1 %	26,100-27,800	73 - 84 %	34,200-35,900	48 - 55 %	22.06 - 23.46	73 - 84 %	28.89 - 30.30	48 - 55 %
Conventional dry cargo vessels	6,400		12,300		0.67		1.29	
- Heavy fuel oil 1%	6,900-7,800	7 - 22 %	12,800-13,700	4 - 11 %	0.72 - 0.81	7 - 21 %	1.33 - 1.42	3 - 10 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	7,200-8,300	12 - 29 %	13,100-14,200	7 - 15 %	0.75 - 0.86	12 - 27 %	1.37 - 1.47	6 - 14 %
- Light fuel oil 0.1 %	11,100-11,800	73 - 84 %	17,000-17,700	38 - 44 %	1.14 - 1.20	69 - 79 %	1.74 - 1.80	35 - 40 %
Dry bulk vessels	10,400		19,000		0.29		0.53	
- Heavy fuel oil 1%	11,100-12,600	7 - 22 %	19,800-21,300	4 - 12 %	0.31 - 0.35	7 - 21 %	0.55 - 0.59	4 - 11 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	11,600-13,000	12 - 29 %	20,300-22,000	7 - 16 %	0.33 - 0.37	12 - 27 %	0.57 - 0.65	7 - 15 %
- Light fuel oil 0.1 %	17,900-8,600	73 - 84 %	26,600-30,100	40 - 46 %	0.50 - 0.70	72 - 83 %	0.74 - 0.77	39 - 44 %

Vessel type	Fuel costs € per travel day	Percentage increase	Vessel costs € per travel day	Percentage increase	Fuel costs €/TEU per travel day	Percentage increase	Vessel costs €/TEU per travel day	Percentage increase
Tankers	10,100		21,700		0.40		0.86	
- Heavy fuel oil 1%	10,800-12,300	7 - 22 %	22,300-23,800	3 - 10 %	0.43 - 0.48	6 - 20 %	0.88 - 0.93	3 - 8 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	11,400-13,000	12 - 29 %	22,900-24,500	6 - 14 %	0.45 - 0.51	11 - 26 %	0.90 - 0.95	5 - 11 %
- Light fuel oil 0.1 %	17,500-18,600	73 - 84 %	29,000-30,100	34 - 39 %	0.66 - 0.70	65 - 74 %	1.10 - 1.13	28 - 32 %
Ro-ro vessels	14,600		29,300		1.70		3.41	
- Heavy fuel oil 1%	15,600-17,800	7 - 22 %	30,300-32,400	3 - 11 %	1.82 - 2.06	7 - 21 %	3.53 - 3.77	3 - 10 %
- Heavy fuel oil 0.5 %	16,400-8,800	12 - 29 %	31,100-33,500	6 - 14 %	1.91 - 2.19	12 - 29 %	3.62 - 3.89	6 - 14 %
- Light fuel oil 0.1 %	25,300-26,900	73 - 84 %	39,900-41,600	37 - 42 %	2.92 - 3.11	72 - 83 %	4.62 - 4.80	35 - 41 %
Car and passenger ferries	41,200		95,400					
- Heavy fuel oil 1%	44,000-50,100	7 - 22 %	98,300-104,300	3 - 9 %				
- Heavy fuel oil 0.5 %	46,300-53,100	12 - 29 %	100,500-107,400	5 - 13 %				
- Light fuel oil 0.1 %	71,300-75,900	73 - 84 %	125,600-130,100	32 - 36 %				

2.3.2.3 Disponibilidad de los combustibles con bajo contenido en azufre

Existe una gran preocupación sobre si la industria del refino de petróleo podrá satisfacer la demanda de combustibles con bajo contenido de azufre que exigirá la regulación de la OMI a partir de 2020, puesto que la gran mayoría de los barcos que están actualmente navegando y consumen fueles marinos, lo hacen con combustibles cuyo contenido en azufre se encuentra en márgenes entre el 1,0 y el 4,0 %.



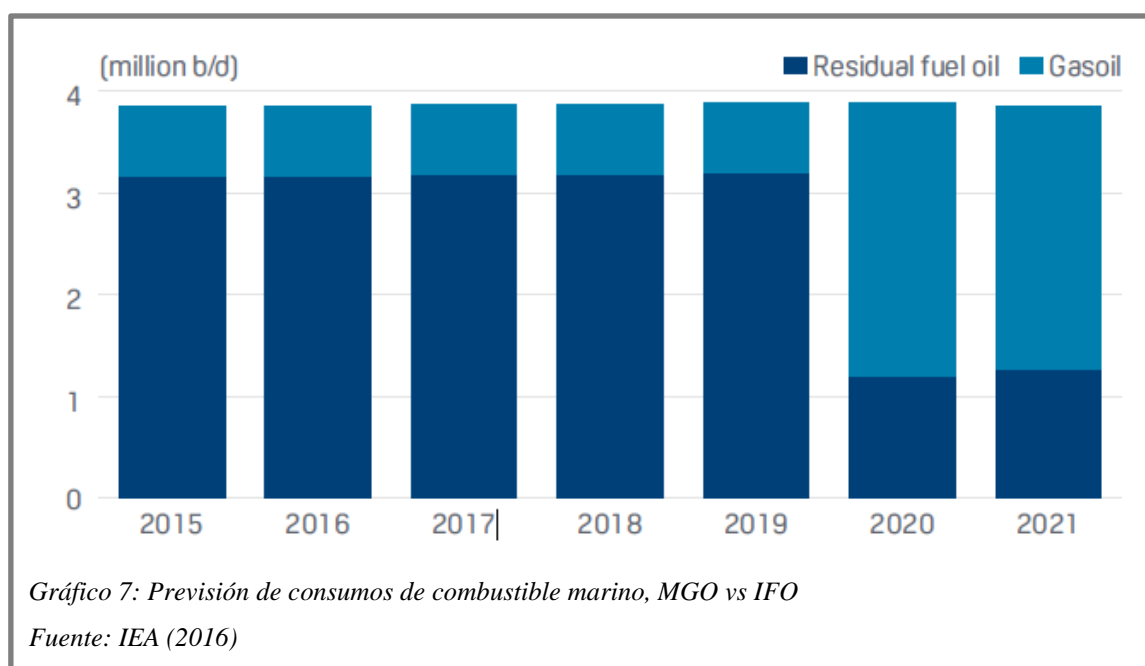
Como queda de relieve en este cuadro, alrededor del 0.5% de barcos consumen combustible con 0.5% de azufre, es decir, el combustible que deberá ser consumido a partir de 2020.

Vista esta situación, en 2016, la OMI decidió contratar los servicios de la organización independiente de investigación y consultoría CE Delft para que llevase a cabo un estudio sobre la disponibilidad de los combustibles con bajo contenido de azufre para 2020 (MEPC, 2016). También pospuso hasta 2018 la decisión de implementar la regla del azufre en función de este estudio, pudiendo posponer la entrada en vigor de la misma de 2020 a 2025.

En dicho estudio, CE Delft asegura que las expansiones de las unidades secundarias de refino deberían permitir al sector cumplir con la demanda de combustibles destilados que

supondrá la normativa. Sin embargo, sus predicciones para 2020 pueden variar dependiendo de las decisiones estratégicas de las refinerías.

Según la agencia internacional de energía (IEA), se espera que la mayoría de las navieras opten por cambiar a gasoil marino en lugar de utilizar fueles residuales altamente refinados:



Finalmente, una vez analizado este estudio, la OMI, en la sesión 71 del MEPC (MEPC, 2017), tomó la decisión de anular la reunión del 2018 y dejar fija la fecha de implantación de la regla para 2020.

2.3.3 USO DE GNL

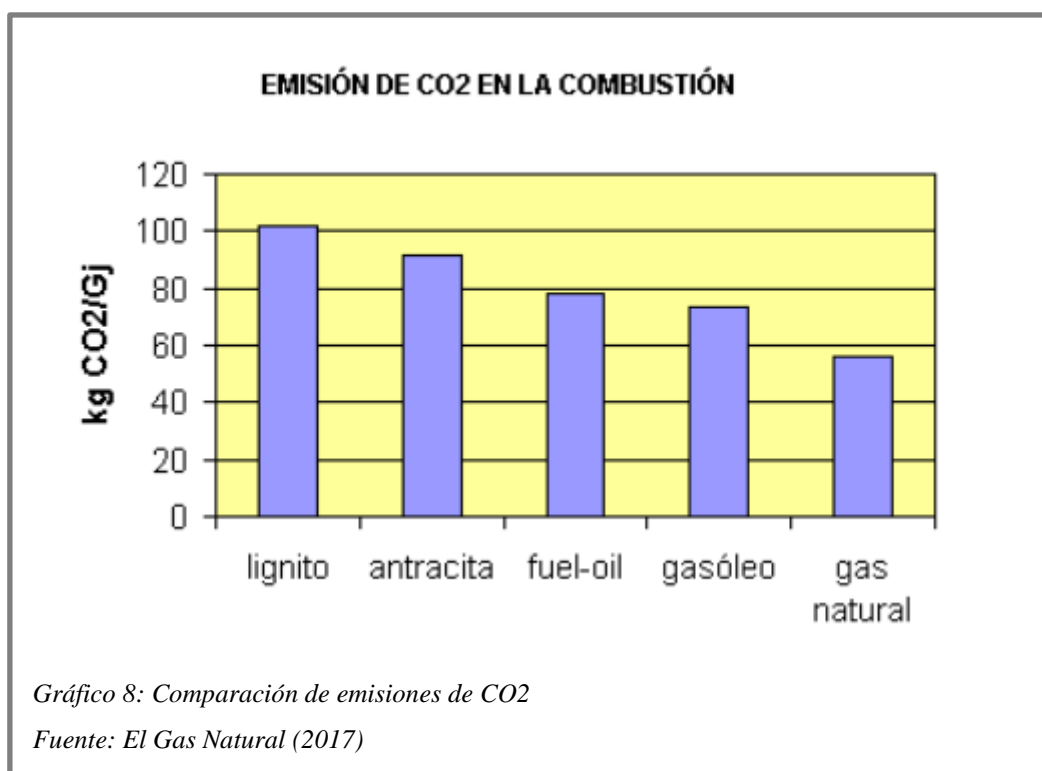
Otra de las opciones para cumplir la normativa, como se ha descrito anteriormente, es el uso de gas natural licuado como combustible.

2.3.3.1 Ventajas del uso de GNL

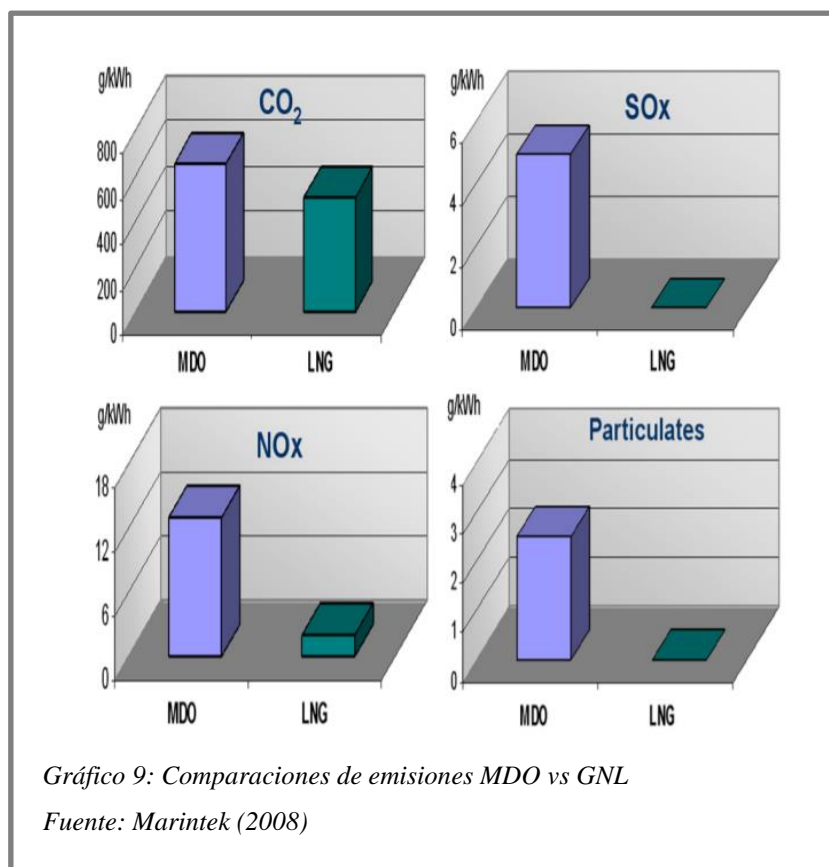
- **Emisiones**

Dentro de los combustibles fósiles, el gas natural es el que menor impacto medioambiental posee, tanto en las fases de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización (*El Gas Natural*).

Además, gracias a la menor cantidad de residuos producidos en la combustión, puede ser utilizado como fuente de energía directa, evitando los procesos de transformación como los que tienen lugar en las plantas de refino de crudo.



Al igual que con el CO₂, el gas natural produce menos cantidad de NO_x, SO_x, y materia particulada (*El Gas Natural*).



CO₂

Gracias a la alta proporción hidrógeno-carbono de las moléculas del gas natural, las emisiones de CO₂ son un 25-30% menores que las del fuel-oil.

NO_x

Cuando se quema gas natural, al hacerse en fase gaseosa, permite alcanzar una mezcla más perfecta con el aire de combustión, esto hace que las combustiones sean completas y más eficientes.

Y la propia composición del gas natural hace que se generen dos veces menos de emisiones de NO_x que el fuel-oil.

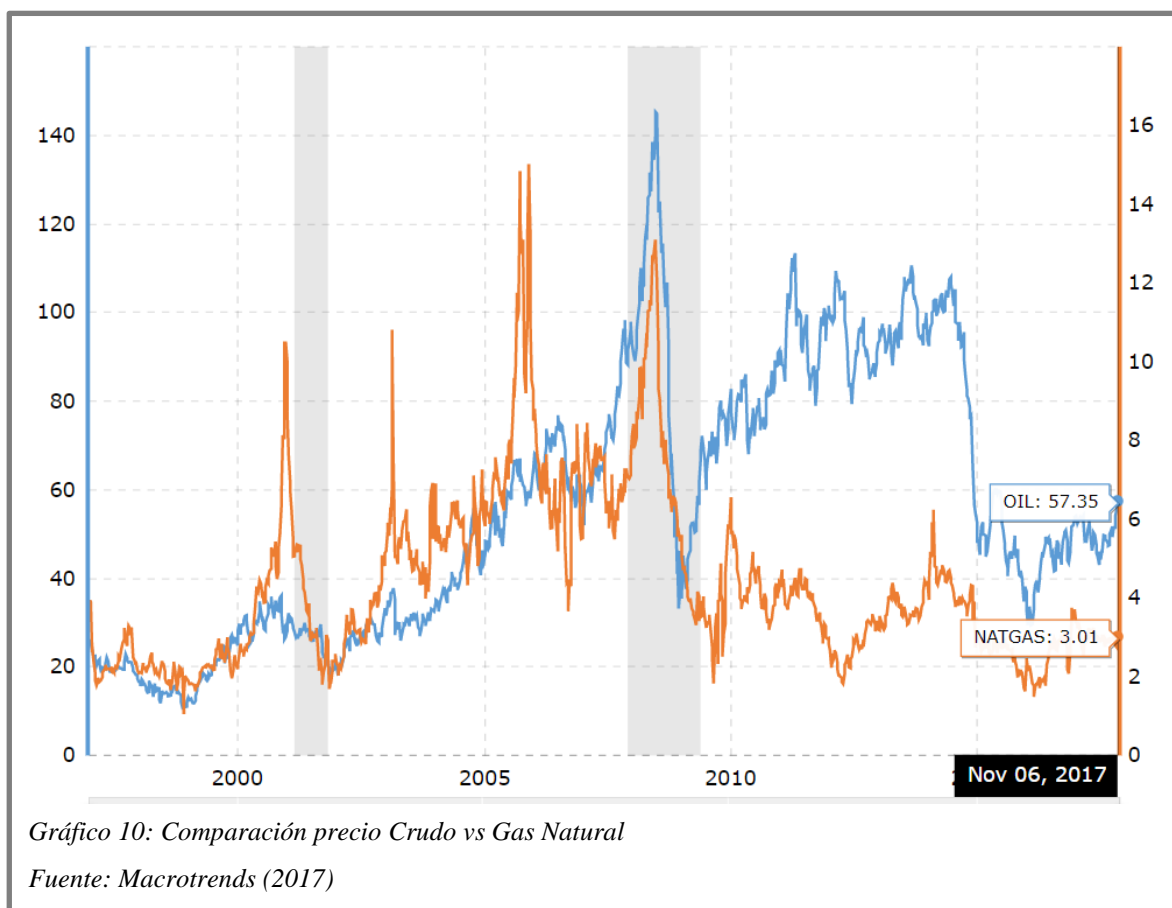
SO_x

El gas natural tiene un contenido en azufre inferior a las 10 ppm, por lo que la emisión de SO₂ en su combustión es 150 veces menor a la del gas-oil, y 2.500 veces menor que la que emite el fuel-oil.

Materia particulada

Como resultado de la falta de impurezas y residuos en el gas natural, no hay emisión de partículas sólidas, hollines, humos, etc., este hecho permite además utilizar los gases de combustión de forma directa en cogeneración.

- **Precio**



Como se observa en el gráfico, el precio del crudo es muy superior al del Gas Natural.

2.3.3.2 Problemática del GNL

Pueden destacarse tres problemas respecto al uso de GNL, la necesidad de terminales de abastecimiento del GNL, el incremento de tamaño de los tanques de almacenamiento de combustible en los buques, y los riesgos de su utilización (*EXPONAV, 2017*).

En el caso de los buques metaneros, no hay problema de espacio de los tanques de combustible, ya que, como se describió anteriormente, estos buques alimentan sus motores con el boil-off gas, el gas que se evapora de los tanques de carga.

El problema viene en buques cuya carga no es GNL, pero lo utilizan como combustible, en este caso, los buques requerirán una mayor inversión inicial que un buque convencional, además de la necesidad de contar con más espacio para el almacenamiento del gas, mermando así su capacidad de carga.

Otro problema que acarrearán, son los riesgos en el manejo y el almacenamiento del gas puesto que, para almacenarlo en estado líquido, exige que se cuente con estructuras complejas para descender su temperatura hasta los -163°C , y mantenerlo a la misma en tanques con un gran aislamiento y un consumo energético importante para ese aislamiento.

Otra de las desventajas que entraña el GNL, es durante el avituallamiento, es decir, la propia fiabilidad del suministro. Al ser un combustible repartido de forma irregular y muy concentrado en algunas zonas geográficas, encarna dificultades para poder abastecerse en ciertas zonas del mundo. Sin embargo, en lugares donde si hay un suministro fijo y una buena infraestructura, puede resultar muy conveniente para trayectos cortos y puertos fijos.

2.3.4 USO DE SISTEMAS LIMPIEZA DE GASES

La instalación de torres de lavado de gases o scrubber puede ser la solución para muchas navieras a la problemática de la normativa de la OMI, pero también acarrea sus problemas.

Tabla 10: Comparación de inversiones según decisión tomada

Fuente: bunkerindex (2009)

Vessel Type & fuel usage per year: IFO (with total vessel power)	Indicative Scrubber cost (US\$)	Increased fuel cost averaged at \$80 over 5 years (1.5% then 1%)	Increased fuel cost averaged at \$80 over 10 years (1.5% then 1%)
Ferry 23,850 tons (34MW)	3,400,000	7,200,000	14,400,000
Tanker 28,000 tons (30MW)	2,400,000	11,200,000	24,400,000
Cruise 40,000 tons (40MW)	3,200,000	16,000,000	32,000,000
Vessel Type & fuel usage per year: Distillate (with total vessel power)	Indicative Scrubber cost (US\$)	Increased fuel cost averaged at \$500p/t over 5 years	Increased fuel cost averaged at \$500p/t over 10 years
Ferry 23,850 tons (34MW)	3,400,000	45,000,000	90,000,000
Tanker 28,000 tons (30MW)	2,400,000	70,000,000	140,000,000
Cruise 40,000 tons (40MW)	3,200,000	100,000,000	200,000,000

En la tabla se puede ver que la instalación de una torre de lavado supondría una inversión puntual bastante importante, además del tiempo que deberá pasar parado en astillero.

Hasta ahora, los buques que instalaban este tipo de sistemas de limpieza, son buques que navegan en gran medida por zonas ECA, por lo que la inversión resulta rentable, al tener que conseguir una reducción acorde a combustibles con 0.1% de azufre, cuyo precio es elevado, al ser combustibles destilados.

A partir de 2020, la situación será diferente, y buques cuya navegación no pase por zonas ECA podrían tener que instalar este tipo de sistemas.

A pesar de esto, la instalación de scrubber sería la opción minoritaria, alrededor del 15 por ciento de los buques optarían por esta medida, (*Platts, 2016*).

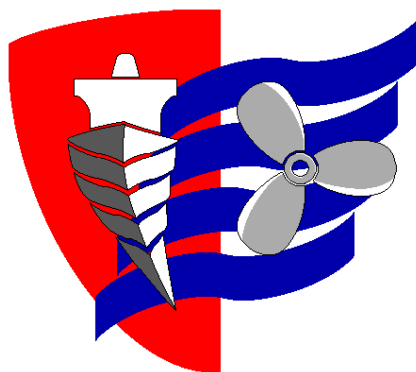
La elección de esta opción depende de una serie de variables:

- El tiempo de navegación del buque por zonas ECA, si este es elevado, la inversión podría ser buena.
- La vida útil restante del buque.
- El precio futuro de los fueles, es decir, si la diferencia de precio entre el fuel oil con 0.5% de azufre que habría que utilizar si no se cuenta con scrubber, y el fuel oil con 3.5% de azufre que sería válido para usar contando con un sistema scrubber, sería suficientemente importante como para compensar la inversión inicial.
- Que el buque tenga capacidad física para montar un sistema de este tipo.

Según Longhurst J., en el foro de la International Bunker Industry Association (IBIA) en Londres, “los buques más grandes, que constituyen solo el 6% de la flota mercante mundial, suman el 30% del consumo total. Para estos buques, el consumo de combustible es una partida clave de sus costes totales y el uso de scrubbers será la forma más económica de cumplir las nuevas normas para los buques grandes” (*Anave, 2017*).

BP ha instalado ya scrubbers en dos petroleros de 80.000 tpm y los resultados hasta ahora son muy positivos, a pesar de los retos tecnológicos que supuso su instalación en buques existentes. Una vez resueltos los problemas, los scrubbers, funcionando en ciclo abierto, reducen el azufre de los gases de exhaustación de modo que los buques pueden consumir HFO con 3,5% de azufre emitiendo gases como si estuviesen consumiendo combustible con 0,5% de azufre.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



APLICACIÓN PRÁCTICA

3 APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 INSTALACIÓN DE SCRUBBER EN BUQUE MV FICARIA SEAWAYS

A continuación, se hará un estudio sobre la instalación de un sistema de lavado de gases de escape o scrubber en el buque de carga rodada MV Ficaria Seaways.

Se trata de un buque Ro-Ro ya en uso, construido en el astillero Flensburger Schiffbau-Gesellschaft de Flensburg, Alemania, en 2006, (*FleetMon, 2017*), cuya zona de operación es el Mar del Norte, siguiendo rutas fijas entre Suecia, Dinamarca e Inglaterra.



Ilustración 13: Buque MV Ficaria Seaways

Fuente: FleetMon (2016)

3.1.1 INTRODUCCIÓN

3.1.1.1 Datos generales del buque (FleetMon, 2017):

Nombre	FICARIA SEAWAYS
Tipo de buque	Buque de carga rodada (Ro-Ro)
Número IMO	9320568
Bandera	Dinamarca
Eslora	229 m
Manga	25 m
Calado	7.0 m
Año de construcción	2006
Constructor	Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, Alemania
Peso muerto	14300 t
Arqueo bruto	37939 t
Capacidad de personal	12 personas
Dueño del buque	DFDS A/S

3.1.1.2 Capacidad de carga

- Capacidad de carga de vehículos:
 - 275 coches
 - 307 trailers

3.1.1.3 Motor principal, auxiliares, y otros sistemas

Motor principal:

- 1 x 9 cilindros MAN B&W type 9L60MC-C8-TI 2 tiempos diesel.
- Potencia: 21060 kW
- Velocidad: 22,4 nudos

Generadores auxiliares:

- MAN B&W Diesel 6880 kW

Hélice propulsora:

- 1 x hélice de paso variable

Hélices de maniobra de proa:

- 2 x 1100 kW

Hélices de maniobra de popa:

- 2 x 880 kW

3.1.2 OBJETIVOS Y CONCLUSIONES

El proyecto consta en la instalación de una torre de lavado de gases de escape a bordo del buque *Ficaria Seaways* perteneciente a la naviera danesa DFDS.

La obra se realizó en el astillero alemán MWB Moterenwerken Bremerhaven AG en Julio de 2009.

Se trata de un proyecto importante puesto que supuso la instalación de la torre de lavado de mayor tamaño en un buque, además de la primera instalada para un motor principal de 2 tiempos de gran potencia (21060 kW).

Las restricciones en materia de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de buques ya descritas en el apartado **2.2 Reducción del contenido de azufre en combustibles líquidos**, han animado a la Agencia Danesa para el Medioambiente, junto con las empresas privadas Alfa Laval Aalborg y MAN Diesel & Turbo a elaborar este proyecto con inicio en 2008 bajo un programa que promueve nuevas tecnologías medioambientales.

La torre de lavado de gases usada es un modelo híbrido de Alfa Laval, capaz de operar en modo (SW) agua de mar, y (FW) agua dulce, cuyo funcionamiento está detallado en el apartado **2.3.4. Métodos Secundarios**.

La decisión de instalar este tipo de torre de lavado de gases es la de comparar las ventajas y desventajas de los dos modelos, SW y FW.

Tras realizar pruebas en tierra, los resultados mostraron que era posible reducir el nivel de SO₂ por debajo de los 19 ppm en los gases de escape. Lo que correspondería a utilizar un combustible con contenido en azufre por debajo del 0.10%. En consecuencia, el buque estaría cumpliendo con la normativa de la IMO referente al límite de emisiones de gases de efecto invernadero.

Otro aspecto para tener en cuenta a la hora de cumplir con la normativa de la IMO es la calidad del agua resultante del lavado de los gases. Esta agua debe cumplir con las especificaciones en cuanto a pH, a PAH y a nitratos.

Y, al igual que con la concentración de SO₂ en los gases, cuyos resultados son satisfactorios, los análisis del agua resultante de la limpieza también resultan satisfactorios, como se muestra en la siguiente tabla, donde se comparan los resultados obtenidos en los dos modelos de funcionamiento, SW y FW, con los límites que establece la IMO:

Tabla 11: Límites establecidos por la IMO

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

	pH	Turbidez en el agua de entrada [FNU]	PAH [ppb] ^b	Nitratos [% eliminado de los gases de escape]
Modo SW	3 a 6	< 5	< 1	0.2
Modo FW	> 6.5	< 25	< 2	< 1
MEPC.184(57)9 (solo en puerto)	> 6.5	< 25	< 50	< 12

a) Los valores de pH se pueden aumentar mezclando el agua con agua de mar.

b) Estos resultados son normalizados para un flujo de agua de 45 m³ por MWh de potencia del motor.

En términos de consumo de combustible, en el modo SW, el aumento en el consumo sería de alrededor de 1.4%, requerido en el bombeo del agua (1 % MCR), y en un ligero aumento de la contrapresión de los gases de escape del motor (sobre el 0.4 %).

Por el contrario, en el modo FW, el aumento en el consumo de energía vendría por parte del consumo de hidróxido de sodio, que debe ser producido en tierra, y este sería de entorno al 3.4 %.

Este sistema de lavado de gases de escape instalado a bordo el buque Ficara Seaways ha sido aprobado de acuerdo con el MEPC.170(57) por un periodo de prueba de 18 meses, que empezó el 1 de marzo de 2010.

Con los resultados obtenidos en los cerca de dos años de pruebas, el sistema se aprobó para su uso permanente, incluyendo revisiones constantes del agua de descarga.

3.1.3 INSTALACIÓN DE LA TORRE DE LAVADO

La torre de lavado de gases instalada en este buque tiene como principales componentes la torre de absorción de los gases, y el sistema de suministro, circulación y descarga de agua dulce o agua marina.

La ventaja del modo SW es que no se utilizan químicos, puesto que el agua contiene bicarbonatos naturales que neutralizan el SO_2 absorbido.

En el modo FW es necesario añadir continuamente hidróxido de sodio (NaOH) para neutralizar el SO_2 absorbido.

3.1.3.1 Datos Técnicos

La torre de absorción de gases tiene 4.6 metros de diámetro, y una altura de 10 metros. Está hecha en gran medida de acero inoxidable resistente al agua de mar, y pesa (incluida el agua) 32 en modo operación. El sistema es capaz de tratar hasta 192.000 kg/h de gases de escape.

Además de la torre de lavado en sí misma, se instalaron unos 200 metros de tubería, con diámetros entre 300 y 500 mm, para transportar el agua desde y hasta la misma.



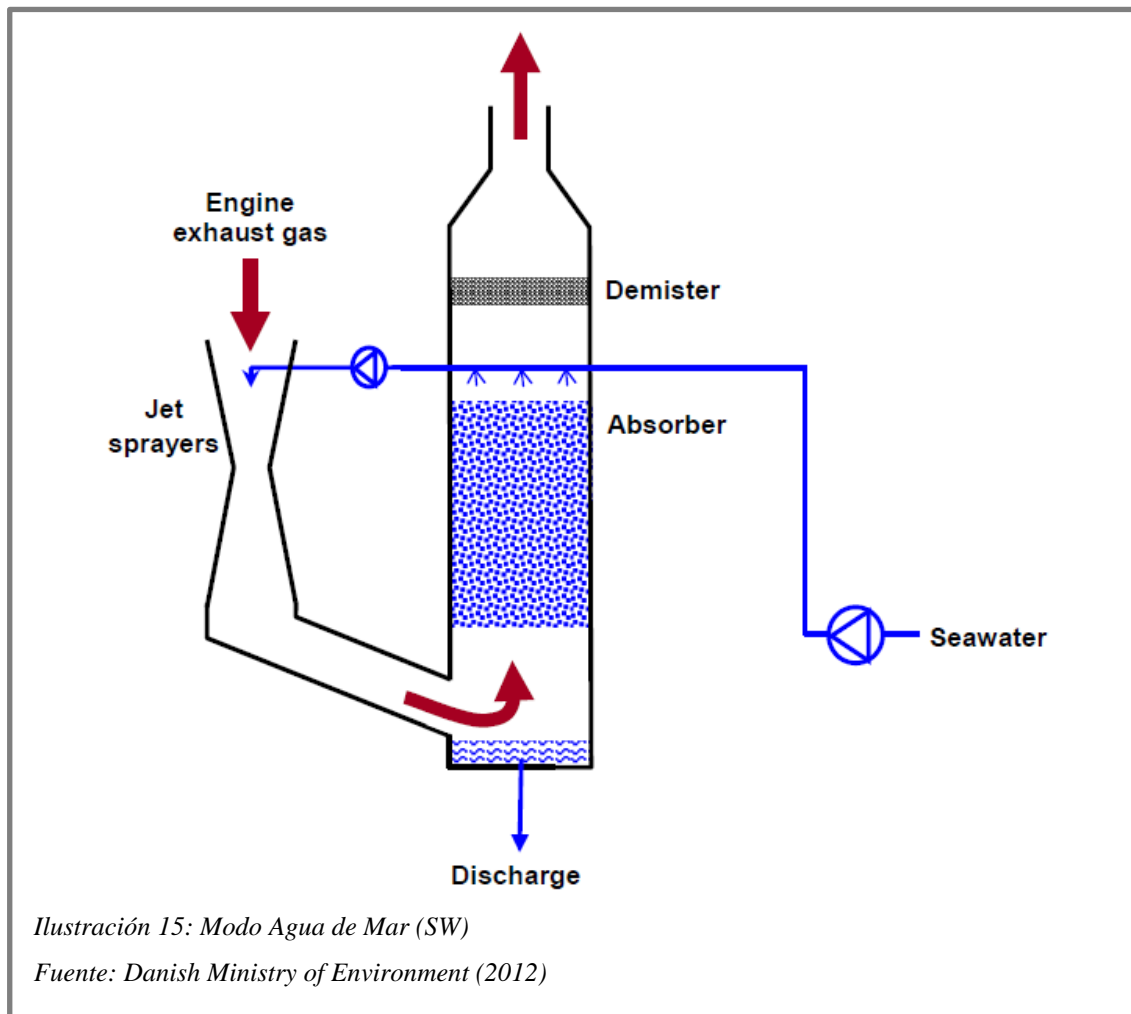
Ilustración 14: Instalación de la torre de lavado a bordo del FICARIA SEAWAYS

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

3.1.3.2 Descripción de los modos de operación

Modo agua de mar (SW)

El modo de operación SW o de ciclo abierto, aprovecha la alcalinidad natural del agua de mar para absorber y adherirse a los SO_x de los gases de escape.



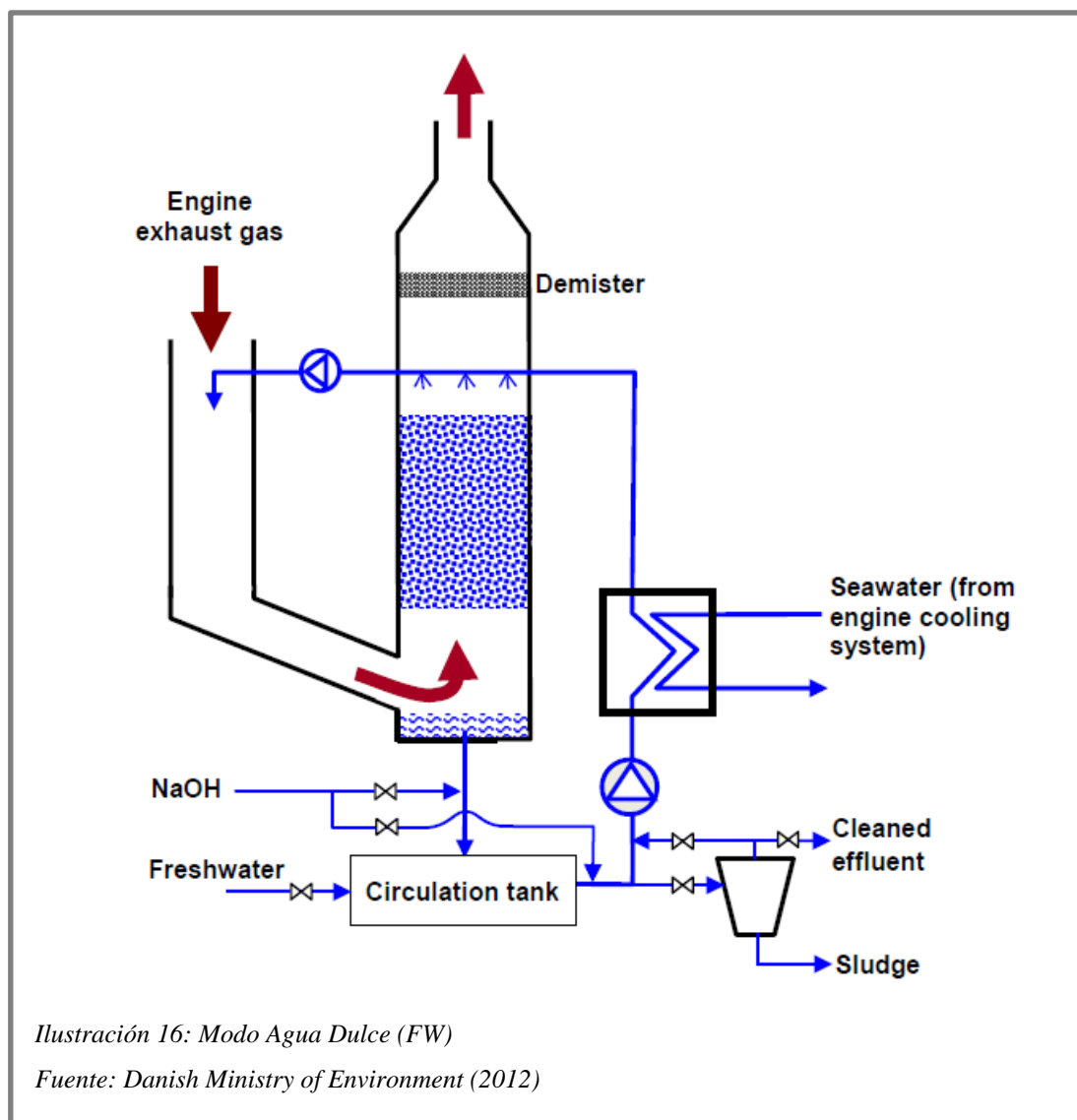
En la figura 35 podemos observar cómo se dispone la torre de lavado en el modo SW. Los gases de escape son aprovechados calóricamente en una caldera de recuperación hasta reducir su temperatura hasta cerca de los 208°C , y se hacen pasar por un silenciador. A continuación, los gases pasan por un Venturi, donde también se inyecta agua de mar, de ahí se van a la torre de absorción, donde una ducha de agua marina a baja presión cubre toda el área de la torre. La tendencia de los gases calientes a subir hace que pasen a través de la cortina de agua.

Por último, los gases pasan por el desnebulizador, o dispositivo antiniebla.

Una vez que el agua de mar ha pasado por todo el circuito, se descarga directamente al mar, de ahí que a este modo de operación se le llame ‘circuito abierto’.

Modo Agua Dulce (FW)

En el modo agua dulce o circuito cerrado, la torre de lavado recircula agua dulce, a la que continuamente se le añade hidróxido sódico (NaOH) para mantener el pH en valores alcalinos, imitando así la cualidad natural del agua de mar para absorber los SO_x de los gases de escape.



Este circuito tiene algunas modificaciones con respecto al de agua marina. Se incorpora un tanque de recirculación del agua dulce, desde el cual el agua pasa a través del circuito ayudado por una bomba; existe también un intercambiador de calor de placas que utiliza agua de mar para reducir el calor que el agua dulce va adquiriendo en el ciclo; y, por último, el sistema de adición de NaOH, que se puede añadir antes o después de la torre de lavado.

Cuando se funciona en modo agua dulce, existe la ventaja de que el agua puede ser recirculada durante 6 horas con la máxima carga del motor (MCR) sin tener que realizar ninguna descarga al mar.

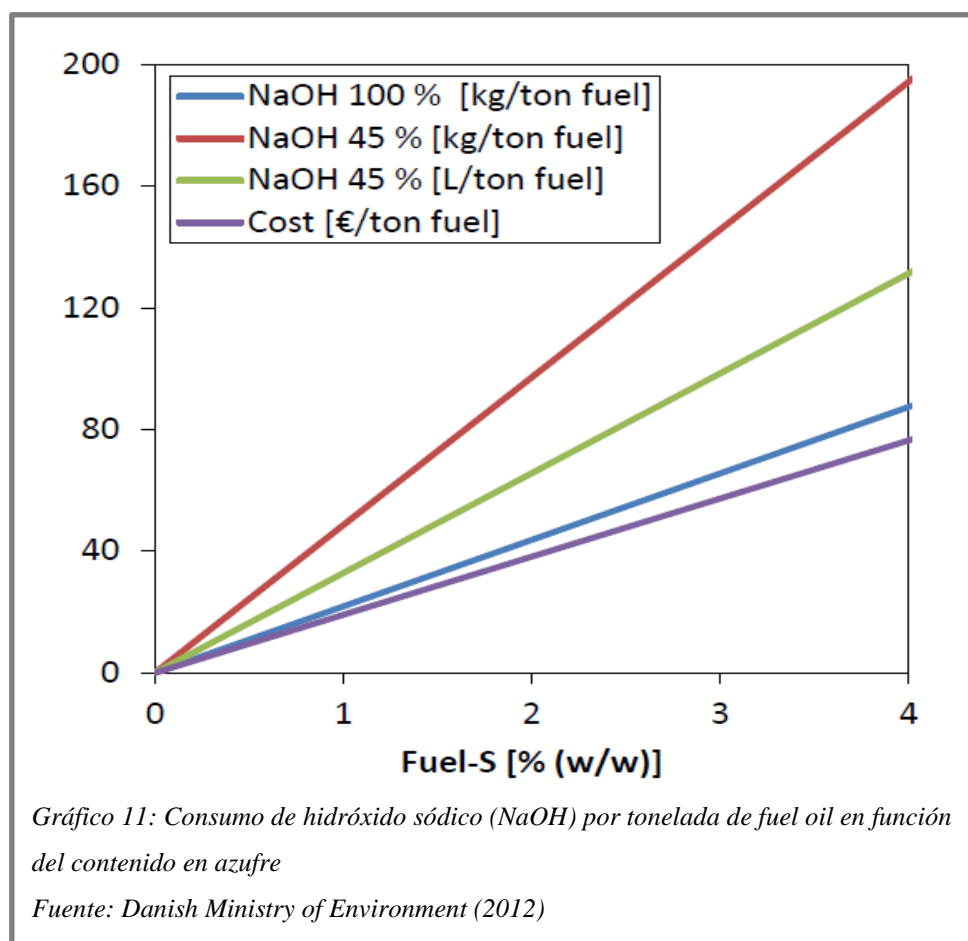
El tiempo de recirculación sin descarga vendrá limitado por el volumen de agua en el tanque, el cual se saturará de sulfato de sodio. Antes de llegar a este punto, es necesario limpiar el agua de hollines (no de sulfato de sodio), y proceder a su descarga.

Como ya se ha apuntado anteriormente, la principal desventaja de este modo es el consumo de hidróxido sódico (NaOH).

Particularmente para este proyecto, se llegó al cálculo de que por cada mol de azufre contenido en el fuel oil, se necesitan añadir 1.75 moles de NaOH.

Dentro de los diferentes NaOH que se pueden conseguir en el mercado, se optó en este caso por utilizar una solución de NaOH y agua con una concentración del 45%, y para evitar que se solidifique (a aproximadamente 8°C), se instaló una cámara calefactada con capacidad para almacenar 5 tanques IBC de 1000 litros.

A continuación, se muestra una gráfica de coste y consumo de NaOH:



La línea azul representa el consumo de un hipotético NaOH con una concentración del 100%, las líneas roja y verde representan el consumo del NaOH utilizado (45% de concentración) en litros y en kilos. La línea morada representa los costes reales incluyendo el transporte, entrega a bordo y devolución de los tanques vacíos (*precios de enero de 2011*).

3.1.4 CONSUMO DE ENERGÍA

La bomba instalada en el circuito para mover el agua a través de este es de 180 kW, cuyo consumo, con el motor a máxima carga, corresponde con aproximadamente el 1% de su potencia.

Por otro lado, la torre de lavado crea una contrapresión de hasta 30 milibares, que también aumenta el consumo de energía del motor. Por medio de una válvula de bypass colocada en el escape del motor antes de la torre de lavado, la constructora del motor pudo hacer una estimación del consumo adicional de energía con el motor a carga constante, el cual resultó en alrededor del 0.4% (*MAN Diesel & Turbo*).

En el modo agua dulce (FW), se debe tener en cuenta la energía utilizada en tierra para producir el NaOH. La forma más común de producirlo, y la usada en este caso, es la electrólisis por diafragma, la cual requiere una energía de 5000 kWh por tonelada producida. Tomando como base un HFO con una concentración en azufre del 2.2%, y una energía de 41000 kJ/kg, la energía para producir el NaOH corresponde al 2.1% de la energía del HFO.

Si se eligiese la opción de utilizar combustibles destilados con un contenido en azufre de 0.1% en lugar de las torres de lavado, el coste de energía en tierra sería aún más alto, puesto que, para conseguir estos combustibles altamente destilados, se necesita un proceso de refinado mucho más complicado y costoso. En consecuencia, el consumo de energía aumentaría en un 15% en comparación con el 7% que conllevan los procesos de refinado convencionales. Los consumos adicionales resultan así en una emisión adicional de CO₂ que habría que tener en cuenta.

Tabla 12: Consumos de energía

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

	Modo agua de mar (SW)	Modo agua dulce (FW)	Combustible bajo en azufre (0.1%)
Bombas	1.0 %	1.0 %	0
Contrapresión en el motor	0.4 %	0.4 %	0
Energía en tierra	0.0 %	2.0 %	15 %
Total	1.4 %	3.4 %	15 %

En la tabla se representa el consumo de energía según el método utilizado para reducir las emisiones de SO₂.

3.1.5 OBTENCIÓN DE DATOS

Para la toma de datos se usaron una serie de sensores, transmisores y analizadores que registraban los datos cada 30 segundos y se guardaban por periodos de 24 horas:

- 17 transmisores de presión (agua y gas)
- 11 transmisores de temperatura (agua y gas)
- 1 analizador de gas que mide SO₂, CO₂ y O₂.
- 2 analizadores de turbidez (agua)
- 2 analizadores de pH (agua)
- 1 analizador de PAH (agua)
- 8 medidores de caudal (agua)
- 140 señales de 0 o 1 para sensores de posición de válvulas, arranque/paro de bombas, etc.

Los datos obtenidos son almacenados a bordo del barco y en tierra para documentación y futuros análisis.

3.1.6 MEDICIÓN DE LOS GASES

Todo el sistema de medición está diseñado de acuerdo con el Anexo VI del MARPOL, código técnico de NO_x de 2008, apéndice III. Apartado **2.3.4.3 Planes para la legalidad de los scrubber.**

Se extrae una cantidad de gas de entre 72 y 120 L/h del escape después de la torre de lavado, se hace pasar por un filtro cerámico de 2 micras calentado a una temperatura mínima de 180 °C, de ahí se dirige por medio de una manguera calentada a mín. 180 °C a un secador para eliminar el vapor de agua. Es necesario que los medidores de gas trabajen con gas seco, para

evitar falsas mediciones por el vapor además de evitar que los analizadores se dañen por los condensados.

El analizador de gases utilizado es un Siemens ULTRAMAT 23 NDIR:

Tabla 13: Rango de medición del analizador Siemens ULTRAMAT 23 NDIR

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

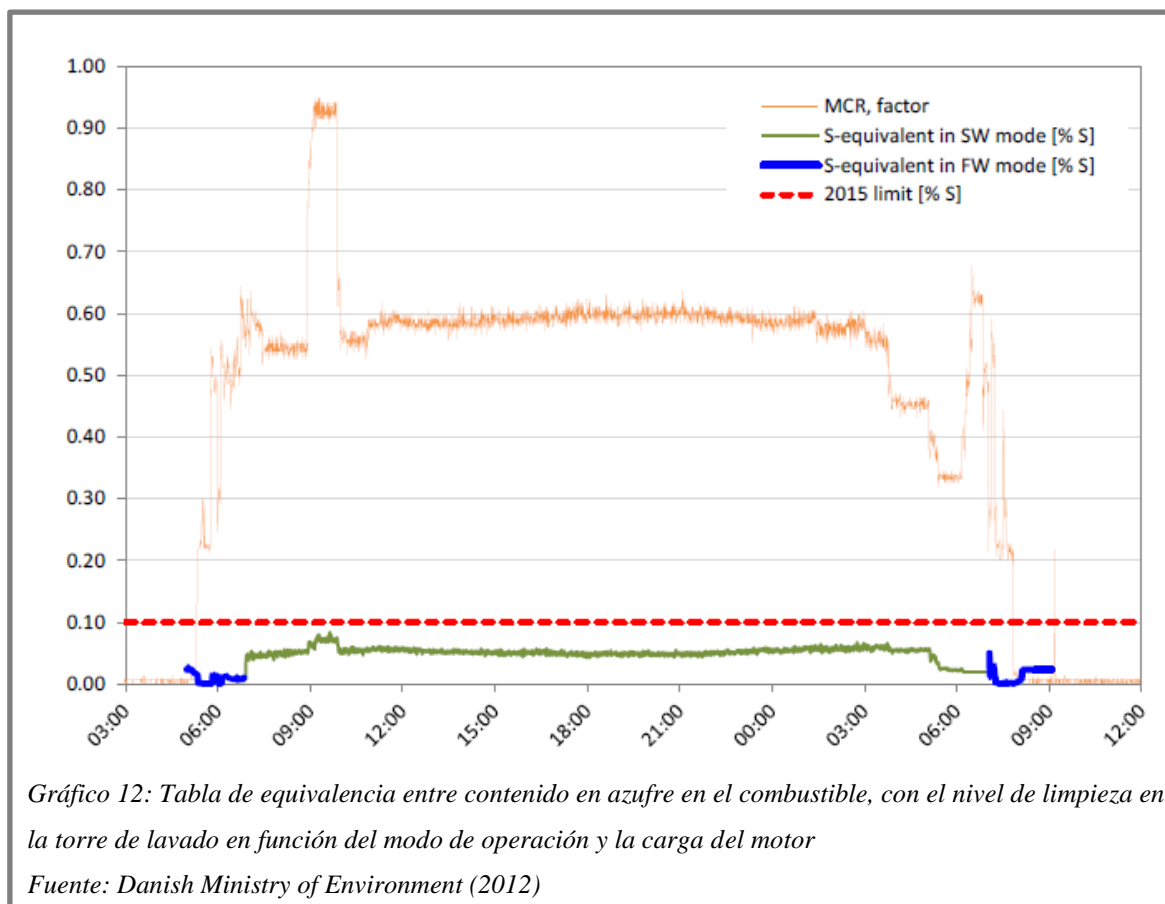
	Rango	Unidad
SO ₂	0 – 250	ppm (vol/vol), seco
CO ₂	0 – 10	% (vol/vol), seco
O ₂	0 - 21	% (vol/vol), seco

Las células de medición del SO₂ y del CO₂ calibran su cero automáticamente cada hora con aire puro.

El rango de SO₂ y CO₂ se comprueban regularmente con un gas de calibración certificado que contiene 200 ppm de SO₂ y un 8% de CO₂ en N₂ seco.

3.1.6.1 Eliminación de SO₂

La cantidad de SO₂ eliminada y el equivalente de azufre en el combustible es una función no lineal del caudal de agua en la torre de lavado, la presión del agua inyectada en los sprays de ‘jet’, el nivel de azufre del combustible, y la carga del motor (MCR). También depende del modo de operación de la torre (SW o FW).



Como se ve en la gráfica, el contenido máximo de azufre es aproximadamente del 0.07% a máxima carga del motor. Este valor es significativamente inferior al límite de los 0.10% en azufre.

Estos datos son obtenidos con mediciones realizadas después de la torre de lavado con un flujo de agua constante de aproximadamente 900 m³/h.

El gráfico muestra la operación del buque en un viaje entre Gothenborg e Immingham.

Como se puede apreciar, el sistema opera en modo agua dulce (FW) durante los tránsitos en puerto.

3.1.6.2 Eliminación de Sólidos Suspendidos

Las mediciones fueron llevadas realizadas con un Escáner de Tamaño de Partículas en Movimiento, o Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS); con un Impactor Eléctrico de Baja Presión, o Electrical Low Pressure Impactor (ELPI); y un Contador de Partículas Condensadas (CPC).

Las mediciones revelaron distribuciones binomiales de tamaño de entre 5 y 30 mm la primera vez, y entre 50 y 100 mm la segunda. La reducción en concentración (en número no en masa) una vez atravesada la torre de lavado es de entre el 31% y el 53%.

3.1.6.3 Eliminación de NO_x

La medición de NO_x en el escape fue llevada a cabo por una compañía acreditada con un analizador de gas ABB LIMAS 11 UV entre el 21 y el 22 de septiembre de 2010.

El resultado dio 995 ppm (en seco) tanto antes como después de la torre de lavado, con lo cual, el agua de la torre no absorbe una cantidad de NO_x tangible. Esto significa que se cumple con la normativa en cuanto a descarga de aguas con contenido en NO_x correspondiente al 0.2% de la cantidad de NO_x eliminada de los gases de escape.

3.1.7 ANÁLISIS DEL AGUA DE DESCARGA

3.1.7.1 Modo agua de mar (SW)

1. pH

El pH en el agua de entrada es medido continuamente y da aproximadamente 8.1.

En la descarga, el pH descenderá en función de la cantidad de SO₂ que se hay absorbido por volumen de agua.

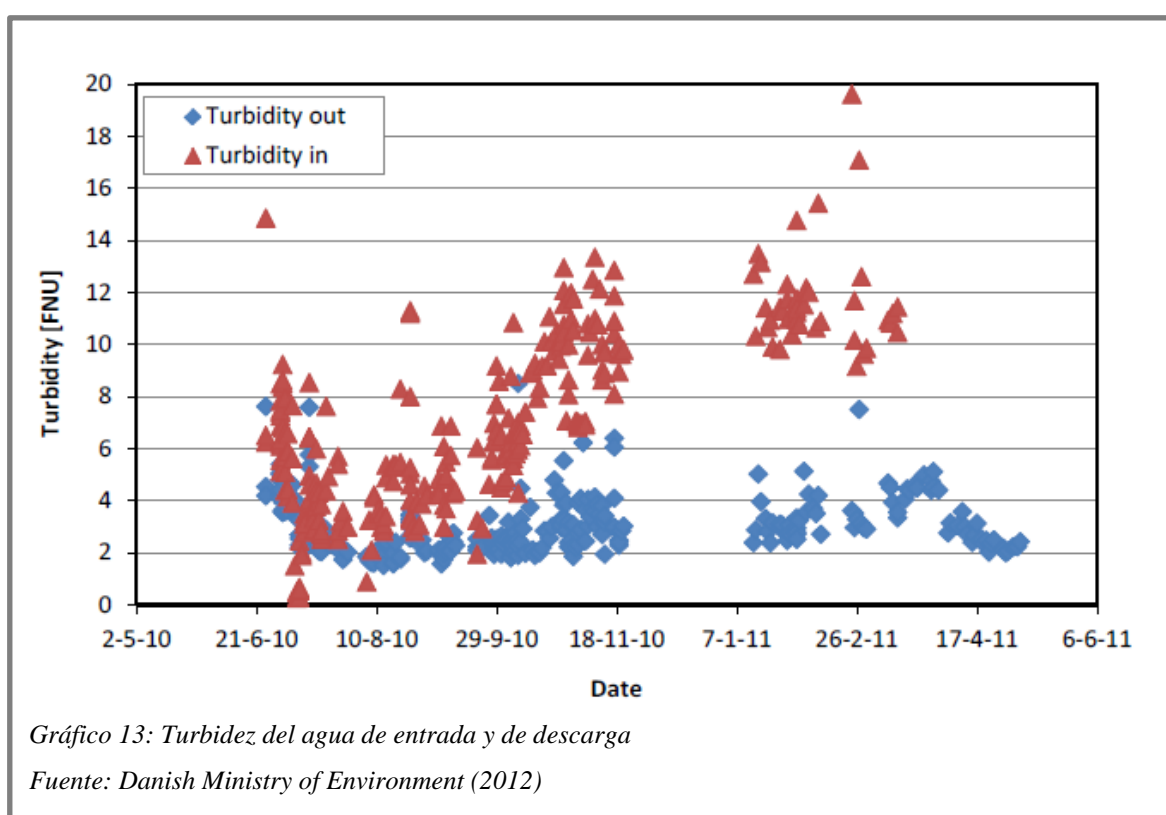
Los valores de pH en la descarga están entre 3.0 y 6.0. Con el aumento de la carga del motor, el pH desciende, así como con el aumento del azufre en el combustible, y un bajo caudal de agua en la torre de lavado.

Aunque el pH sea 3, el agua de descarga será un ácido muy débil. Además, el agua de descarga se mezcla rápidamente con el agua de mar sobre todo si el buque está en movimiento, estabilizándose el pH.

2. Turbidez

La turbidez se mide en el agua de entrada antes de la bomba principal, y en la descarga después de la torre de lavado. Las mediciones se hacen continuamente con un sensor Ultraburb Basic SC con un rango de 0 a 1000 FNU. También se llevaron muestras a un laboratorio especializado.

De acuerdo con las directrices del MEPC, la turbidez del agua de descarga no debe exceder más de 25 FNU la turbidez del agua de entrada.



Como se aprecia en el gráfico 13, la turbidez media del agua de descarga es de 3 FNU, bastante por debajo de los 25 FNU que exige la administración.

La elevada turbidez del agua de entrada es debida a las burbujas de aire del agua, que falsean las medidas.

Las muestras analizadas en laboratorio acreditado dan, de media, una turbidez del agua de entrada de 2.3 FNU, y del agua de descarga de 4.5 FNU. Unos valores que cumplen la disposición de los 25 FNU de diferencia entre ambas aguas.

3. Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH)

El límite de PAH según las directrices del MEPC es inversamente proporcional al caudal de agua y directamente proporcional a la potencia de salida del motor. Por ejemplo, el incremento máximo de manera continuada no puede ser superior a 100 ppb a 22.5 m³/MWh, 50 ppb a 45 m³/MWh, o 25 ppb a 90 m³/MWh.

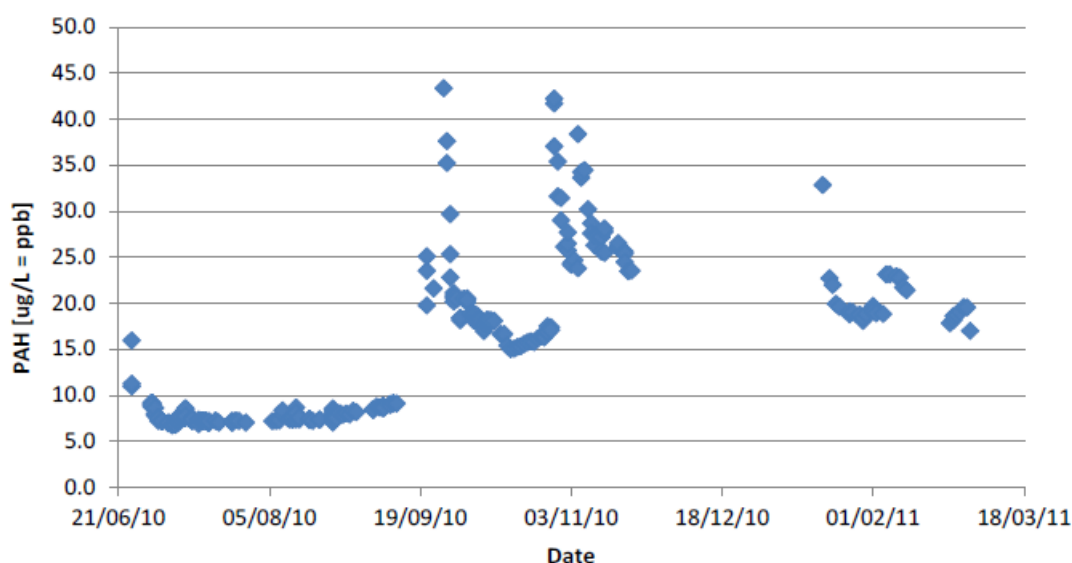


Gráfico 14: Niveles de PAH medidos de forma continuada

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

En el gráfico 14 se aprecia que los valores de PAH son prácticamente constantes (5 – 10 ppb) entre julio y septiembre de 2010. En el periodo de toma de muestra se cubren varias cargas del motor, así como varios caudales de agua, que deberían significar una mayor variación en los valores de PAH. Estos datos hacen indicar que el sensor de monitoreo continuo puede no ser el adecuado para medir el PAH como se pretende en las directrices del MEPC.

Así como se duda de los valores tomados en el periodo entre julio y septiembre, también ofrecen duda los resultados obtenidos en el periodo entre octubre y noviembre de 2010, que muestran un crecimiento hasta casi los 45 ppb en el PAH cuya causa es desconocida. Al igual que con la turbidez, se analizó una muestra de agua en un laboratorio acreditado, donde se encontraron valores totales de PAH en un rango entre 0.5 y 0.7 a 50 m³/MWh.

Estas mediciones son mucho más fiables, y bastante más bajas que los 25 ppb que daba el analizador en el momento de la muestra.

4. Sólidos Suspendidos

Para medir los sólidos suspendidos, se tomaron muestras antes y después de la torre de lavado cuando el buque estaba operando al 85% de carga y en modo agua de mar (SW) con un caudal de 980 m³/h de agua. Las muestras se tomaron en enero de 2011 y se analizaron en un laboratorio acreditado.

Los resultados muestran que el agua de entrada contiene menos sólidos suspendidos que el límite tangible, mientras que la descarga contiene aproximadamente 2.75 mg/L.

Si se multiplica este resultado por el caudal de agua, da como resultado que la torre de lavado atrapa 2.7 kg/h de partículas sólidas, que se corresponden con 0.15 kg/MWh.

5. Aceite en el Agua

Se tomaron muestras de agua funcionando en modo agua de mar (SW) antes y después de la torre de lavado, ambos cuando el buque funcionaba consumiendo combustible bajo en azufre, y combustible alto en azufre.

Aunque las directrices del MEPC no marcan límites en cuanto al contenido de aceite en el agua, se tomaron los datos para comparar con el límite, que sí existe, para el agua de sentinas, con un máximo de 15 ppm. En este caso, las autoridades danesas disponen un límite para la torre de lavado del FICARIA SEAWAYS de 5 ppm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis de las muestras realizado por laboratorios acreditados:

Tabla 14: Resultados de aceite contenido en el agua

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

Position	[mg/L] = [ppm]	[mg/kWh]
SW inlet	1.4	74
SW discharge 1.0% HFO	1.2	65
SW discharge 2.2% HFO	1.9	101

6. Nitratos

Se tomaron muestras en el agua de descarga para determinar nitratos y nitritos. Con un agua de entrada que contiene entre 0 – 5.9 µg N/L, el agua de descarga nos da unos valores entre 31 – 130 µg N/L, valores que dependen de la carga del motor y el caudal de agua que pasa a través de la torre de lavado. Así, la muestra con más concentración se obtuvo con el motor trabajando al 95% de carga, 130 µg N/L que corresponden a 0.028 g NO₃/kWh o 0.021 g NO₂/kWh. Resultados bastante por debajo de los límites que establece el MEPC de 2700 g NO₃/MWh, y también cumplen con las disposiciones de NO_x en forma gaseosa, al no encontrarse rastros en las muestras.

7. Metales pesados

Al igual que con los nitratos, se tomaron muestras del agua de descarga para analizar metales pesados. Las muestras se tomaron con la torre funcionando en modo agua de mar y con el motor consumiendo combustible alto en azufre (2.2%). El consumo de combustible varió entre 1.700 y 3.900 L/h y el caudal de agua entre 780 y 980 m³/h.

Tabla 15: Resultados de los análisis de metales pesados

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

Localización	Entrada SW		Descarga SW	
Elemento	[µg/kg]	[mg/MWh]	[µg/kg]	[mg/MWh]
Vanadio	1.1	77	164	10302
Níquel	2.2	231	43.3	2818
Cromo	0.8	68	5.6	429
Cadmio	0.1	6	0.1	4
Mercurio	<0.05	0	<0.05	0
Plomo	13.3	904	26.4	1569
Arsénico	1.2	105	1.4	88
Cobre	74.4	5120	190	11776
Cinc	124	8492	324	20727
Total		15003		47713

Como se aprecia en la tabla 15, el vanadio, el níquel, el cobre y el zinc son los elementos que más se encuentran en el agua. La diferencia entre el total de metales pesados en el agua de entrada y el de descarga es de unos 33 g/MWh, la cantidad que entra al motor dentro del combustible es de unos 44 g/MWh.

3.1.7.2 Modo agua dulce (FW)

Como se explicó anteriormente, el balance del pH y por lo tanto absorción de SO_2 de los gases de escape, se hace añadiendo continuamente hidróxido sódico (NaOH).

Cuando es necesario que el agua del circuito se limpie, el buque cuenta con una centrifugadora de Alfa Laval. Después se retorna al circuito o se descarga al mar.

1. pH

En el modo agua dulce, el pH se controla con la cantidad de NaOH que se añade al agua, con lo cual la descarga tiene valores de pH por encima de 6.5.

2. Turbidez

Se tomaron varias muestras antes y después de la centrifugadora, que fueron analizadas en un laboratorio especializado. Los resultados muestran una media de 315 FNU antes de la centrifugadora, y entre 5 y 77 FNU después.

Como los resultados del agua que sale de la centrifugadora no son buenos, puesto que superan el límite establecido de 25 FNU, se hizo una modificación del sistema de limpieza para mejorar su eficiencia y fiabilidad, a partir de la cual, el sistema empezó a cumplir con las disposiciones.

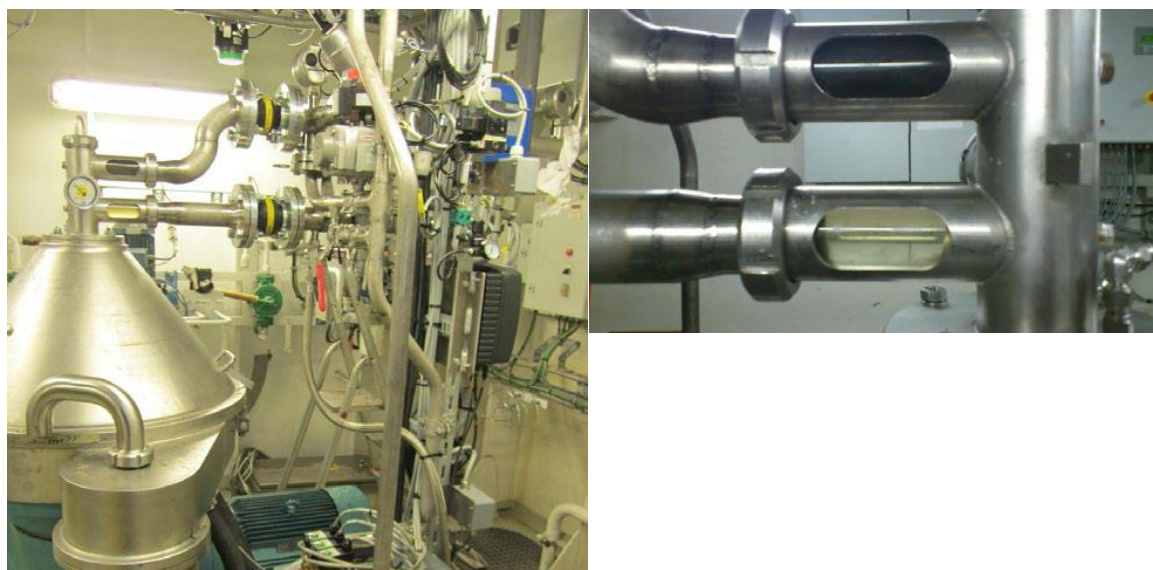


Ilustración 17: En la foto de la izquierda, se observa la centrifugadora de tipo separador de alta velocidad, el agua a la entrada tiene 250 FNU de media, mientras que ahora en la salida hay valores en torno a 10 FNU. En la foto de la derecha, se ve el separador desde el cual los lodos son enviados a un tanque de almacenamiento.

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

3. Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH)

Se tomaron muestras en enero de 2011 después de la centrifugadora de agua para analizar PAH en un laboratorio acreditado. Los niveles están entre 0.52 y 1.31 ppb. Estas concentraciones son muy bajas, y cumplen con creces los límites del MEPC.

4. Metales Pesados

Tabla 16: Contenido de metales pesados

Fuente: Danish Ministry of Environment (2012)

Unidad	HFO 2.2% S		Lodo de la Centrifugadora		Agua de Descarga	
	[mg/kg]	[mg/MWh]	[mg/kg]	[mg/MWh]	[mg/kg]	[mg/MWh]
Vanadio	155	28675	6600	5315	3	1105
Níquel	47	8695	4000	1911	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Cromo	3	555	250	121	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Cadmio	3	555	<0.05	84	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Silicio	9	1665	n/a	n/a	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Hierro	22	4070	n/a	n/a	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Mercurio	n/a	n/a	0.03	0	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Plomo	n/a	n/a	43	6	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Arsénico	n/a	n/a	6	1	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Cobre	n/a	n/a	780	117	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Cinc	n/a	n/a	370	56	< 1 (d.l)	< 368 (d.l)
Total	44215		7611		n/a	

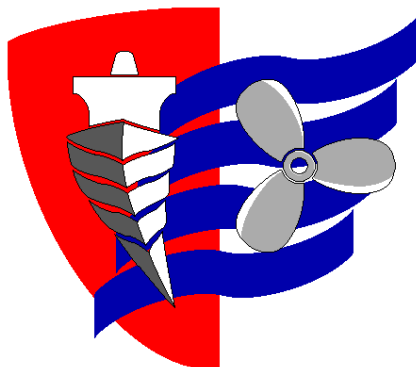
Las concentraciones de metales pesados después de la centrifugadora son mucho más bajas que en el modo agua salada.

5. Nitratos y Nitritos

Se tomaron muestras en enero de 2011 de agua que llevaba 5 horas y media circulando sin descarga. El motor principal entregó 57 MWh de potencia durante ese tiempo. El contenido en nitrito (NO₂) y nitrato (NO₃) aumentó desde 0 mg/L en el agua limpia a 153

mg/L de nitrito y 63 mg/L de nitrato. Estos valores son significativamente más bajos que los valores límite establecidos por el MEPC.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



CONCLUSIONES

4 CONCLUSIONES

Cada vez se hace más evidente que el calentamiento global está afectando a la tierra, tanto al planeta en sí, como a los seres vivos que lo habitamos, es por eso que, una de las medidas que se están tomando a cabo para frenar o ralentizar este proceso es definir normativas que regulen la contaminación antropogénica del aire.

Uno de los gases a controlar, es el óxido de azufre, SO_2 , debido a sus efectos perjudiciales tanto para las personas, los animales y las plantas.

Con la adopción del Anexo VI del MARPOL y su entrada en vigor en 2005, se han ido introduciendo progresivamente reglas para reducir la emisión de contaminantes, en el caso del SO_2 , imponiendo reducciones en el contenido de azufre en los combustibles marinos. El límite actual se define en un 0.1% de azufre para combustibles destinados a ser utilizados por buques que naveguen por zonas de control de emisiones o zonas ECA, y en 3.5% para combustibles utilizados fuera de las zonas ECA. Sin embargo, a partir de 2020, el límite para la navegación fuera de las zonas ECA, se reducirá a 0.5% de azufre en el combustible.

Esta medida hará que las emisiones se reduzcan significativamente, pero también supondrá un reto para las compañías navieras, los armadores, las refinerías de petróleo, etc.

El reto estriba en la elección que se debe tomar para cumplir con la normativa de reducción de emisiones, ésta da como opción alternativa a la utilización de combustibles con bajo contenido de azufre, el empleo de otros combustibles que aseguren una baja emisión de contaminantes, o la instalación de sistemas de limpieza de gases de escape que aseguren unos valores de emisión equivalentes a los que resultarían de la combustión de combustibles con bajo contenido de azufre.

Por parte de las refinerías de petróleo, su reto personal será desarrollar la tecnología o los medios necesarios para asegurar que habrá oferta suficiente de combustibles con menos del 0.5% de azufre a partir de 2020 para satisfacer la demanda.

Las compañías navieras tienen el desafío de tomar la mejor decisión para con sus intereses económicos, esta depende de varios aspectos:

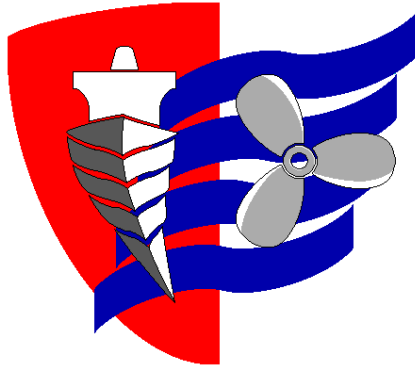
- La vida útil restante del buque, un dato importante para valorar si una opción tendrá rentabilidad o no.

- La zona de navegación que el buque frecuentará. Aunque el límite fuera de las zonas ECA se haya endurecido, la diferencia entre la navegación dentro y fuera de las mismas supone un cambio importante al tratarse de un cambio de combustibles residuales a destilados, con su inherente coste adicional.
- A parte de la zona de navegación por la que se moverá el buque, es también importante ver la ruta que hará, es decir, si es una ruta variable o fija, de ser una ruta fija, puede haber la opción, dependiendo de la disponibilidad, de utilizar combustibles alternativos, como el gas natural.
- El precio futuro del combustible bajo en azufre, este es un aspecto fundamental, que hará que las compañías se decanten por una medida u otra.

Los armadores deberán tomar una decisión parecida a las navieras, con la diferencia de que se trataría de buques nuevos, elegir entre instalar tecnología para quemar gas natural como combustible, con su problemática en cuanto a disponibilidad y tratamiento de éste; construir un buque convencional, es decir, con motor diésel, y quemar combustible bajo en azufre; o instalar desde un principio un sistema de lavado de gases de escape.

Con la descripción dada de cada opción y su análisis, la decisión puede resultar más sencilla.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SITIOS WEB:

- Organización Marítima Internacional, <http://www.imo.org/ES/Paginas/Default.aspx>, [consultada en septiembre de 2017]
- Zona Económica, <https://www.zonaeconomica.com/>, [consultada en septiembre de 2017]
- Formulación Química, <http://www.formulacionquimica.com/>, [consultada en septiembre de 2017]
- Dióxido de Azufre, 2017. Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos, <https://www.epa.gov/>, [consultada en septiembre de 2017]
- Marine Marchande, <http://www.marine-marchande.net/>, [consultada en octubre de 2017]
- Gas Canarias S.A., <http://www.gascan.es/gascan/home-es>, [consultada en octubre de 2017]
- GNL Quintero, 2017. <http://www.gnlquintero.com/index.htm>, [consultada en octubre de 2017]
- Alfa Laval, 2017. Pure SOx, <http://www.alfalaval.com/puresox/>, [consultada en octubre de 2017]
- Exhaust Gas Cleaning Systems Association, 2015 <http://www.egcsa.com/>, [consultada en octubre de 2017]
- Stock Logistic Transport SL, <http://www.stocklogistic.com/>, [consultada en octubre de 2017]
- Marintek, 2008. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/magalog_lng_supply_chain.pdf, [Consultada en octubre 2017]
- El Gas Natural, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, <http://www.minetad.gob.es/energia/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx>. [Consultada en noviembre de 2017]
- Macrotrends, 2017 <http://www.macrotrends.net/2500/crude-oil-vs-natural-gas-chart>. [Consultada en noviembre de 2017]

- Exponav, 2017 <https://www.exponav.org/sera-el-gas-natural-licuado-el-combustible-naval-del-futuro/>. [Consultada en noviembre de 2017]
- Bunkerworld, 2017 <http://www.bunkerworld.com/prices/>. [Consultada en noviembre de 2017]
- IEA (Agencia Internacional de Energía), 2016 <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2015&category=Key%20indicators&indicator=TPESbySource&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=BALANCES&showDataTable=false>. [Consultada en noviembre de 2017]
- Anave, scrubbers como solución para cumplir con la OMI, <http://www.anave.es/prensa/ultimas-noticias/1636-los-scrubbers-son-la-solucion-mas-barata-para-cumplir-las-nuevas-normas-sobre-azufre-segun-bp>. [Consultada en noviembre de 2017]
- FleetMon, Ficaria Seaways, https://www.fleetmon.com/vessels/ficaria-seaways_9320568_52812/. [Consultada en agosto de 2018]

NORMATIVA:

- Directiva (UE) 2016/802 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de mayo de 2016 relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos.
- Comité de protección del medio marino (MEPC), 71º periodo de sesiones 3-7 de julio de 2017.
- Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, Convenio MARPOL, edición de 2010.
- Third IMO GHG Study, 2014.
- Resolución MEPC.184 (59), Adoptada el 17 de julio de 2009, Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape, 2009.
- MEPC, (2016), sesión 70, resolución MEPC.280 70, 2016
- ISO 8217 (2017) FUEL STANDARD FOR MARINE DISTILLATE FUELS

ARTÍCULOS:

- Lamas M.I., Rodríguez C.G., **2012**, Emissions from Marine Engines and NOx Reduction Methods, Journal of Maritime Research, Vol. IX, No.I, pp. 77 – 82. <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/172/168>. [Consultada en septiembre de 2017]
- Kraus R.S., **2010**. Proceso del Refino del **Petróleo**. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, Apartado 78, Petróleo y Gas Natural. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/78.pdf>. [Consultada en septiembre de 2017]
- García Soutullo R., **2016**. Sistemas de contención en buques gaseros (Tipos de tanques), 2016. Ingeniero Marino. <http://ingenieromarino.com/>. [Consultada en octubre de 2017]
- Conde Cid L., Fernández Vacas F., Martínez Melgarejo M.J., Desgaste adhesivo (scuffing) en camisas de cilindros y aros de pistón de motores diesel lentos de dos tiempos, **2002**. Vector Plus nº 20. <http://www.repuestosbarcos.com/Scuffing.pdf>. [Consultada en octubre de 2017]
- Kalli J., Karvonen T., Makkonen T., Sulphur content in ships bunker fuel in **2015**. A study on the impacts of the new IMO regulations and transportation costs. Ministry of Transport and Communications. <https://www.lvm.fi/documents/20181/817543/Julkaisu+31-2009/cfb920d0-d1c5-4c4f-94e2-7a92e58adc9d?version=1.0>. [Consultada en noviembre de 2017]

TRABAJOS UNIVERSITARIOS:

- Caro Pardá A., **2006**, Biodesulfuración de fracciones petrolíferas: tratamiento de dibenzotiofeno en distintas condiciones de operación, Universidad de Alcalá de Henares.
- Sin M., **2014**, Instalación y análisis de un sistema de limpieza de gases de escape para un buque Ro-Ro, Universidad Politécnica de Cataluña.

LIBROS:

- Gran Larousse Universal, Vol. 15, Edición Española de 1994. Plaza & Janés.
- Jaén González A., Calventus Solé Y., **2006**. Tecnología energética y medio ambiente, Vol. 1. Universidad Politécnica de Cataluña.

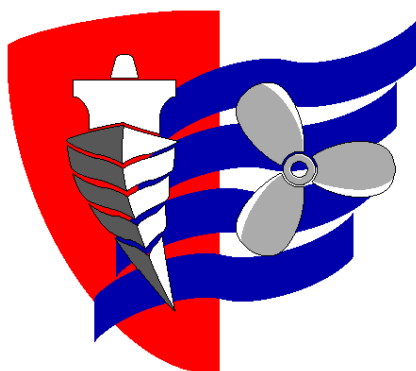
INFORMES:

- Sedigas. 2016. Asociación Española del Gas. Informe anual. El Gas en Europa y en el mundo. <http://www.sedigas.es/informeannual/2016/wp-content/uploads/2017/06/Informe-anual-2016-EL-GAS-EN-EUROPA-Y-MUNDO.pdf>. [Consultada en octubre de 2017]
- Norwegian Marine Technology Research Institute, Marintek. 2008. D5-1 The overall aspects of an LNG supply chain with starting point at Kollsnes and alternative sources. https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/magalog_lng_supply_chain.pdf. [Consultada en octubre de 2017]
- Review of maritime transport, (2017). United Nations Conference on Trade and Development. 2017. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf. [Consultada en octubre de 2017]
- Platts, (2016). The IMO's 2020 global sulfur cap. <https://www.platts.com/IM.Platts.Content/InsightAnalysis/IndustrySolutionPapers/SR-IMO-2020-Global-sulfur-cap-102016.pdf>. [Consultada en noviembre de 2017]
- Danish Ministry of the Environment. Environmental. Project No. 1429, 2012. Exhaust Gas Scrubber Installed Onboard MV Ficaria Seaways. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/06/978-87-92903-28-0.pdf>. [Consultada en agosto de 2018]

APUNTES UNIVERSITARIOS:

- Félix M. Otero González, 2016. MOTORES DE GAS DE CICLO DIESEL. EL MOTOR DUAL O DE DOBLE COMBUSTIBLE: CARACTERÍSTICAS Y ELEMENTOS COMPONENTES.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



ANEXOS

6 ANEXOS

Valores equivalentes de emisión para los métodos de reducción de emisiones contemplados en el apartado 2.3 Métodos de reducción de emisiones.

21.5.2016

ES

Diario Oficial de la Unión Europea

L 132/73

ANEXO I

VALORES EQUIVALENTES DE EMISIÓN PARA LOS MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTEMPLADOS EN EL ARTÍCULO 8, APARTADO 2

Límites del contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo contemplados en los artículos 6 y 7 de la presente Directiva y en las Reglas 14.1 y 14.4 del anexo VI del Convenio MARPOL, y valores de emisión correspondientes contemplados en el artículo 8, apartado 2

Contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo (% m/m)	Relación de emisiones de SO ₂ (ppm)/CO ₂ (% v/v)
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

Nota:

- Los límites establecidos para la relación de emisiones solo se aplican cuando se utilizan fuelóleos destilados o residuales derivados del petróleo.
- En casos justificados, cuando la unidad de depuración de los gases de escape reduzca la concentración de CO₂, esta última puede medirse en la entrada de la unidad de depuración de los gases de escape, siempre que la exactitud de dicha metodología pueda ser claramente demostrada.

Criterios de utilización de los métodos de reducción de emisiones contemplados en el apartado 2.3 Métodos de reducción de emisiones.

L 132/74

ES

Diario Oficial de la Unión Europea

21.5.2016

ANEXO II

CRITERIOS DE UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTEMPLADOS EN EL ARTÍCULO 8, APARTADO 4

Los métodos de reducción de emisiones contemplados en el artículo 8 deberán cumplir al menos los criterios especificados en los siguientes instrumentos, según proceda:

Método de reducción de emisiones	Criterios de utilización
Mezcla de combustible para uso marítimo y de gas de evaporación	Decisión 2010/769/UE de la Comisión ⁽¹⁾ .
Sistemas de depuración de los gases de escape	Resolución MEPC.184(59), adoptada el 17 de julio de 2009. El agua de lavado resultante de los sistemas de depuración de los gases de escape que hagan uso de aditivos, preparados y productos químicos relevantes creados <i>in situ</i> a que se refiere el punto 10.1.6.1 de la Resolución MEPC.184(59) no podrá ser descargada en el mar, incluidos los puertos cercados, las dársenas y los estuarios, salvo que el operador del buque demuestre que dicha descarga de agua de lavado no tiene repercusiones negativas significativas ni presenta riesgos para la salud humana o el medio ambiente. Si el producto químico utilizado es soda cáustica, es suficiente con que el agua de lavado cumpla los criterios establecidos en la Resolución MEPC.184(59) y su pH no exceda de 8,0.
Biocombustibles	Uso de biocombustibles, tal y como se definen en la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo ⁽²⁾ , que cumplan las normas CEN e ISO pertinentes. Las mezclas de biocombustibles y combustibles para uso marítimo deberán cumplir las normas relativas al contenido de azufre establecidas en el artículo 5, el artículo 6, apartados 1, 2 y 5, y el artículo 7 de la presente Directiva.

⁽¹⁾ Decisión 2010/769/UE de la Comisión, de 13 de diciembre de 2010, por la que se establecen los criterios aplicables para que los buques de transporte de gas natural licuado empleen métodos tecnológicos como alternativa a la utilización de combustibles de uso marítimo con un bajo contenido de azufre que cumplan los requisitos del artículo 4 *ter* de la Directiva 1999/32/CE del Consejo, relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos, modificada por la Directiva 2005/33/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo al contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo (DO L 328 de 14.12.2010, p. 15).

⁽²⁾ Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE (DO L 140 de 5.6.2009, p. 16).

Modelo de certificado de cumplimiento de las emisiones de SO_x.

MEPC 59/24/Add.1
ANEXO 9
Página 20

APÉNDICE I

MODELO DE CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LAS EMISIONES DE SO_x



NOMBRE DE LA ADMINISTRACIÓN

CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LAS EMISIONES DE SO_x

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE UNIDAD PARA LOS SISTEMAS DE LIMPIEZA DE LOS GASES DE ESCAPE

Expedido de conformidad con las disposiciones del Protocolo de 1997, enmendado mediante la resolución MEPC.176(58), que enmienda el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978, con la autoridad conferida por el Gobierno de:

.....
(nombre oficial completo del país)

por.....
(título oficial completo de la persona u organización competente autorizada
en virtud de lo dispuesto en el Convenio)

Se certifica que la unidad del sistema para la limpieza de los gases de escape-SO_x (SLGE-SO_x) que se indica a continuación ha sido objeto de reconocimiento de conformidad con las especificaciones que figuran en el Plan A de las Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape – adoptadas mediante la resolución MEPC.***(**).

El presente certificado sólo es válido para la unidad LGE mencionada a continuación:

Fabricante de la unidad	Modelo/tipo	Número de serie	Número de aprobación de la unidad del sistema LGE y del Manual técnico

Todo buque en el que se haya instalado esta unidad del sistema LGE llevará siempre a bordo una copia del presente certificado y el Manual técnico del sistema LGE.

Este certificado tendrá validez durante toda la vida útil de la unidad del sistema LGE, instalada en los buques sometidos a la autoridad de este Gobierno, a condición de que se realicen los reconocimientos prescritos en la sección 4.2 de las presentes directrices y en la regla 5 del Anexo VI revisado del Convenio MARPOL.

MEPC 59/24/Add.1
ANEXO 9
Página 21

Expedido en.....
(lugar de expedición del certificado)

dd/mm/aaaa

.....
(fecha de expedición)

.....
(firma del funcionario debidamente autorizado
que expide el certificado)

(sello o estampilla de la autoridad, según corresponda)

Prueba del método basado en la relación SO_2/CO_2 .

MEPC 59/24/Add.1
ANEXO 9
Página 22

APÉNDICE II

PRUEBA DEL MÉTODO BASADO EN LA RELACIÓN SO_2/CO_2

1 El método basado en la relación SO_2/CO_2 permite vigilar de forma directa las emisiones de los gases de escape a fin de verificar que respetan los límites relativos a las emisiones establecidos en el cuadro 1 de la sección 1.3 de las presentes directrices. En el caso de los sistemas LGE que absorben CO_2 durante el proceso de limpieza de los gases de escape, es necesario medir el CO_2 antes de dicho proceso y utilizar la concentración de CO_2 antes de la limpieza con la concentración de SO_2 tras la limpieza. En el caso de los sistemas de limpieza tradicionales con bajo contenido de álcalis, prácticamente no se absorbe CO_2 durante la limpieza de los gases de escape, por lo que la vigilancia de ambos gases se puede efectuar después del proceso de limpieza.

2 La correspondencia entre la relación SO_2/CO_2 se puede determinar examinando simplemente los contenidos respectivos de carbono por unidad de masa del destilado y del combustible residual. El contenido de carbono de este grupo de combustibles hidrocarbonados, como porcentaje de la masa, es muy similar, mientras que su contenido de hidrógeno es diferente. Por consiguiente, se puede concluir que para un consumo determinado de carbono por combustión, se consumirá azufre en una cantidad proporcional al contenido de azufre del combustible; es decir, la relación entre el carbono y el azufre es constante, tras su ajuste para tener en cuenta el peso molecular del oxígeno de la combustión.

3 Se había previsto inicialmente utilizar la relación SO_2/CO_2 para verificar que se cumplen las emisiones procedentes de los combustibles de un contenido de 1,5 % de azufre. Se puede demostrar que el límite de 65 ($^1\text{ppm}/\%$) de la relación SO_2/CO_2 corresponde a un contenido del 1,5 % de azufre en el combustible calculando en primer lugar la relación entre la masa del azufre del combustible y la masa de carbono que contiene el combustible, que se indica en el cuadro 1 de este apéndice con respecto a diferentes combustibles y contenidos de azufre en el combustible; se incluye el 1,5 % de azufre tanto para los combustibles destilados como los residuales. Dichos cocientes se utilizaron para calcular las concentraciones correspondientes de SO_2 y CO_2 en los gases de escape, concentraciones que figuran en el cuadro 2 de este apéndice. Los pesos moleculares se tuvieron en cuenta para convertir las fracciones de masa en fracciones molares. Por lo que respecta a los combustibles con un 1,5 % de azufre que figuran en el cuadro 2, la cantidad de CO_2 se establece primero en un 8 % y posteriormente se cambia a un 0,5 % a fin de demostrar que el exceso de aire no produce efecto alguno. Como se esperaba, varía la concentración absoluta de SO_2 , pero no el cociente SO_2/CO_2 . Ello indica que tal cociente es independiente de la proporción combustible-aire. En consecuencia, el cociente SO_2/CO_2 puede utilizarse sin problemas para cualquier punto de funcionamiento, incluidos aquéllos en los que no se produce potencia al freno alguna.

Obsérvese que el cociente SO_2/CO_2 varía ligeramente del combustible destilado al residual. Ello se debe a que los dos tipos de combustible tienen una proporción de átomos de hidrógeno y carbono (H:C) muy diferente. En la figura 1 se ilustra cómo se ven afectados los cocientes SO_2/CO_2 por la proporción H:C con respecto a una amplia selección de proporciones H:C y concentraciones de azufre del combustible. Observando la figura 1 puede concluirse que para niveles de azufre del combustible inferiores al 3,00 %, la diferencia en los cocientes S/C para combustibles destilados y residuales es inferior al 5,0 %.

Si se utilizan combustibles no derivados del petróleo, el cociente SO₂/CO₂ apropiado aplicable a los valores que figuran en las reglas 14.1 y/o 14.4 deberá ser aprobado por la Administración.

Cuadro 1: propiedades de los combustibles destilados y residuales*

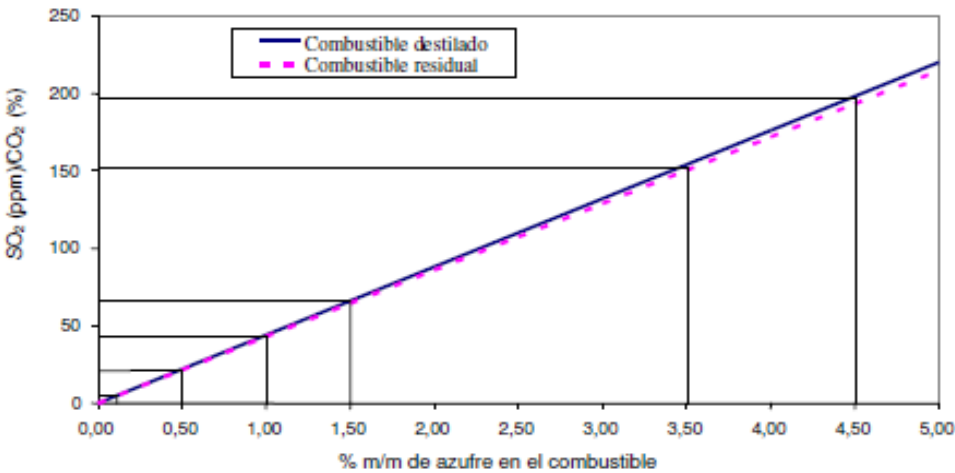
	Carbono	Hidrógeno	Azufre	Otros	C	H	S	S/C del combustible	Exh SO ₂ /CO ₂
Tipo de combustible	%(m/m)	%(m/m)	%(m/m)	%(m/m)	mol/kg	mol/kg	mol/kg	mol/mol	ppm/%(v/v)
Destilado	86,20	13,60	0,17	0,03	71,8333	136	0,0531	0,00074	7,39559
Residual	86,10	10,90	2,70	0,30	71,7500	109	0,8438	0,01176	117,5958
Destilado	85,05	13,42	1,50	0,03	70,8750	134,2	0,4688	0,006614	66,1376
Residual	87,17	11,03	1,50	0,30	72,6417	110,3	0,4688	0,006453	64,5291

* Basado en las propiedades que figuran en las Directrices de la OMI para la vigilancia de los NO_x (resolución MEPC.103(49))

Cuadro 2: Cálculos de las emisiones correspondientes a un contenido del 1,5 % de azufre en el combustible

	CO ₂	SO ₂	SO ₂ /CO ₂ en los gases de escape	S/C en los gases de escape
	‰	ppm	ppm/‰	g/g
Destilado – 0,17 % de S	8	59,1	7,4	0,00197
Residual – 2,70 % de S	8	939,7	117,5	0,03136
Destilado – 1,5 % de S	8	528,5	66,1	0,01764
Residual – 1,5 % de S	8	515,7	64,5	0,01721
Destilado – 1,5 % de S	0,5	33,0	66,1	0,01764
Residual – 1,5 % de S	0,5	32,2	64,5	0,01721

Cociente SO₂/CO₂ en función de % de azufre en el combustible



MEPC 59/24/Add.1

ANEXO 9

Página 24

4 La correspondencia entre 65 (¹ppm/%) SO₂/CO₂ y el valor de 6,0 g/kWh se revela demostrando que sus cocientes S/C son similares. Ello requiere la hipótesis adicional de un consumo de combustible específico al freno (BSFC) por un valor de 200 g/kWh. Tal valor es un promedio apropiado para los motores diésel marinos. El cálculo se efectúa de la siguiente manera:

Nota 1: En el cuadro de emisiones (cuadro 2), los valores de los cocientes de masa S/C calculados *supra*, basados en 6,0 g/kWh y 200 g/kWh BSFC, se encuentran dentro del 0,10 % de los cocientes de masa S/C. En consecuencia, la correspondencia entre 65¹ (ppm/%) de SO₂/CO₂ y el valor de 6,0 g/kWh es estrecha.

Nota 2: El valor de 6,0 g/kWh, y en consecuencia, el valor de 200 g/kWh de consumo de combustible específico al freno (BSFC) se toma del Anexo VI del Convenio MARPOL, adoptado por la Conferencia MARPOL de 1997.

$$S/C_{\text{combustible}} = \frac{SO_2 \text{ específico al freno} * \left(\frac{MW_S}{MW_{SO_2}} \right)}{BSFC * \left(\frac{\% \text{ de carbono en combustible}}{100} \right)}$$

SO₂ específico al freno = 6,0 g/kWh

MW_S = 32,065 g/mol

MW_{SO₂} = 64,064 g/mol

BSFC = 200 g/kWh

% de carbono en combustible con 1,5 % de S (cuadro 1) = 85,05 % (destilado) y 87,17 % (residual)

$$S/C_{\text{combustible residual}} = \frac{6,0 * \left(\frac{32,065}{64,064} \right)}{200 * \left(\frac{87,17 \%}{100} \right)}$$

$$S/C_{\text{combustible residual}} = 0,01723$$

$$S/C_{\text{combustible destilado}} = \frac{6,0 * \left(\frac{32,065}{64,064} \right)}{200 * \left(\frac{85,05 \%}{100} \right)}$$

$$S/C_{\text{combustible destilado}} = 0,01765$$

5 Así pues, las fórmulas de trabajo son las siguientes:

$$\text{Para una combustión completa} = \frac{SO_2 (ppm *)}{CO_2 (\% *)} \leq 65$$

$$\text{Para una combustión incompleta} = \frac{SO_2(\text{ppm}^*)}{CO_2(\% *) + (CO(\text{ppm}^*) / 10\,000) + (THC(\text{ppm}^*) / 10\,000)} \leq 65$$

*Nota: Debe efectuarse un muestreo de las concentraciones de gas o convertirlas al mismo contenido de agua residual (por ejemplo, humedad máxima, humedad mínima).

6 A continuación se explican los principios que justifican la utilización del valor de (²ppm/%) SO₂/CO₂ como límite para determinar el cumplimiento de la regla 14.1 ó 14.4:

- a) Dicho límite puede utilizarse para determinar si los quemadores de fueloil que no producen potencia mecánica cumplen tal regla.
- b) El límite puede utilizarse para determinar el cumplimiento en cualquier potencia de salida, incluso con el motor funcionando en vacío.
- c) El límite solamente exige dos mediciones de la concentración de gas en un punto de muestreo.
- d) No es necesario medir parámetro alguno del motor, tales como régimen, par, flujo de gases de escape o flujo de combustible.
- e) Si las dos mediciones de la concentración del gas se efectúan con el mismo contenido de agua residual en la muestra (por ejemplo, humedad máxima, humedad mínima), en el cálculo no es necesario utilizar los factores de conversión de humedad mínima a máxima.
- f) El límite permite separar por completo la eficacia térmica de la unidad de combustión del fueloil de la unidad LGE.
- g) No es necesario conocer las propiedades del combustible.
- h) Dado que solamente se efectúan dos mediciones en un solo punto, los efectos transitorios del motor o de la unidad LGE pueden reducirse al mínimo alineando las señales de sólo estos dos analizadores. (Obsérvese que los puntos más apropiados para la alineación son aquéllos en los que cada analizador responde a un cambio en escalón en las emisiones en la sonda de muestreo por un 50 % del valor en estado estacionario).
- i) Este límite es independiente de la cantidad de gases de escape diluidos. Puede producirse dilución debido a la evaporación de agua en una unidad LGE, y como parte de un sistema de preacondicionamiento del dispositivo de muestreo de los gases de escape.

² ppm significa "partes por millón". Se parte de la hipótesis de que la medición de las ppm se efectúa mediante analizadores de gas utilizando una referencia molar y partiendo de un comportamiento ideal en los gases. En realidad, las unidades correctas desde el punto de vista técnico son los micromoles de sustancia por mol de cantidad total (µmol/mol), pero se utilizan las ppm a fin de mantener la uniformidad con las unidades que aparecen en el Código Técnico sobre los NO_x.

Aviso responsabilidad UC

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster, así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.